

INGENIEURMÄSSIGES BERECHNUNGSMODELL FÜR STAHL- UND  
SPANNBETON BEI SEHR TIEFEN TEMPERATUREN

Teil 1: Problemstellung und Versuchsprogramm

F o r s c h u n g s b e r i c h t

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy

Dipl.-Ing. J. Scheuermann

Dezember 1984

Gefördert von der Stiftung Volkswagenwerk  
Az.: I/38 044

# Ingenieurmäßiges Berechnungsmodell für Stahl- und Spannbeton bei sehr tiefen Temperaturen

## Gliederung

Teil 1      Problemstellung und Versuchsprogramm

Teil 2      Tieftemperatureigenschaften der verwendeten Baustoffe

Teil 3      Innerer Zwang in Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen  
infolge Abkühlung

Teil 4      Verbundspannungen bei tiefen Temperaturen

Teil 5      Dehnsteifigkeit und Rißbildung bei tiefen Temperaturen

Teil 6      Verformungsverhalten von Wandausschnitten bei tiefen  
Temperaturen

Teil 7      Berechnungsmodell für Stahl- und Spannbeton bei  
sehr tiefen Temperaturen

## Inhaltsverzeichnis

### TEIL 1: Problemstellung und Versuchsprogramm

#### 1. PROBLEMSTELLUNG

#### 2. ZIEL DES FORSCHUNGSVORHABENS

#### 3. VERSUCHSPROGRAMM

##### 3.1 Vorbemerkungen

##### 3.2 Versuche zur Bestimmung der Tieftemperatureigenschaften der verwendeten Baustoffe

##### 3.3 Versuche zur Bestimmung des inneren Zwanges in Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen infolge Abkühlung

##### 3.4 Versuche zum Verbundverhalten

##### 3.5 Versuche an Dehnkörpern zur Bestimmung der Dehnsteifigkeit und der Ribbildung

##### 3.6 Versuche an Wandausschnitten zur Bestimmung des wirklichkeitsnahen Verformungsverhaltens, insbesondere unter Biegung mit Achszug

##### 3.7 Entwicklung eines ingenieurmäßigen Berechnungsmodells für Stahl- und Spannbeton bei sehr tiefen Temperaturen

#### 4. GLIEDERUNG DES FORSCHUNGSBERICHTES

#### 5. LITERATUR

## 1. PROBLEMSTELLUNG

Seit der sog. Ölkrise sind die Industriestaaten auf der Suche nach alternativen Primärenergieträgern, um eigene Energiepolitik, unabhängig vom Druck einzelner Förderländer, betreiben zu können. Eine dieser Alternativen ist Erdgas, das auch in der Bundesrepublik zunehmend an Bedeutung gewinnen wird.

Um Erdgas wirtschaftlich transportieren und lagern zu können, wird es nach erprobter Technologie verflüssigt. Hierbei wird das Volumen des Erdgases bei atmosphärischem Druck auf 1/600 des Ausgangsvolumens verringert. Das verflüssigte Erdgas (LNG = Liquefied Natural Gas) weist allerdings die sehr tiefe Temperatur von ca.  $-162^{\circ}\text{C}$  auf. Dieser Umstand wirft beim Entwurf und der Konstruktion von LNG-Großlagertanks schwierige, materialtechnische und konstruktive Probleme auf.

Die anwendungsbezogene Erforschung der zur Ausführung gelangenden Baustoffe und Konstruktionen muß sich an den besonderen Beanspruchungszuständen für Betriebs- und Störlastfälle bei LNG-Behältern orientieren. Aus diesem Grunde sind an dieser Stelle einige Bemerkungen zu Bauweise, Betrieb und denkbaren Störfällen angebracht, siehe auch /1 bis 5/.

Aus Gründen der Sicherheit werden LNG-Behälter zweischalig gebaut, siehe Bilder 1 und 2. Das eigentliche Lagerbehältnis für das verflüssigte Erdgas stellt der kreiszylindrische Innentank dar. Er ist im Betrieb nach dem ersten behutsamen "Kaltfahren" dauernd tiefkalt. Revisionen, Defekte u.a.m. machen das mehrmalige totale Entleeren und Wiederbefüllen während der Betriebsdauer nötig, dies bewirkt Zyklen extremer Temperaturspannungen. Neben den Temperaturbeanspruchungen wird der Innenbehälter während des Betriebes vom hydrostatischen Druck der Lagerflüssigkeit belastet. In Störfällen wie Erdbeben, Druckwelle u.ä., treten zusätzliche dynamische Beanspruchungen auf, die im Gegensatz zu den Betriebslasten nicht mehr rotationssymmetrisch einwirken.

Der Außenbehälter, im Regelbetrieb dauernd warm, stellt zum einen den äußeren Schutzwall gegen extreme Katastrophen (Brand in Behälterumgebung, Flugzeugabsturz u.a.m.) dar, zum anderen dient er als Schutzhaut für den Fall der Leckage oder gar des Berstens des Innentanks. In letzterem Fall muß der Außentank das Auslaufen von LNG oder das Austreten von Gas vollständig verhindern. Die Erfüllung dieser Aufgabe ist für den Außentank mit extremem Temperaturschock und ggf. schnell ablaufenden Belastungsvorgängen verbunden.

Das Eindringen von Wärme wird durch eine allseitige Wärmedämmung (Thermosflaschenprinzip) verhindert, die zwischen Innen- und Außentank angeordnet ist.

Den geschichtlichen Entwicklungen des Behälterbaus entsprechend, wurden die ersten LNG-Behälter als reine Stahlkonstruktionen ausgebildet. Kaltzähe Stähle fanden sowohl für den Innenbehälter als auch für den Außenbehälter Anwendung. Die internationale Entwicklung zeigt, daß bei den jetzigen üblichen Konstruktionen von LNG-Großbehältern mit einem Fassungsvermögen  $> 50.000 \text{ m}^3$  der Verbundwerkstoff Stahl- bzw. Spannbeton fast ausschließlich für den Außentank verwendet wird, während der Innentank weiterhin aus kaltzähem Nickelstahl besteht. Die Gründe hierfür sind in dem größeren Potential an Sicherheit einer Stahlbeton- bzw. Spannbetonkonstruktion gegenüber einer reinen Stahlkonstruktion in Katastrophenfällen wie Brand, Erdbeben usw. zu finden. Ein weiterer wichtiger Aspekt ist natürlich die Wirtschaftlichkeit. Weitere Sicherheitsanforderungen, hier besonders die Rißzähigkeit der Baustoffe bei tiefen Temperaturen, führten dazu, daß auch der Innentank zunehmend aus Stahl- bzw. Spannbeton erstellt werden soll. Man kann daher davon ausgehen, daß in Zukunft überwiegend LNG-Tanks in Stahl- bzw. Spannbetonbauweise errichtet werden.

Diese Entwicklung wird sich aber nur dann durchsetzen, wenn es gelingt, durch anwendungsorientierte Forschung folgende Problemkreise aufzuhellen:

1. Wie verhalten sich die metallischen Werkstoffe Spannstahl und Betonstahl sowie die metallischen Verbindungen von Spanngliedern unter diesen extrem tiefen Betriebstemperaturen und in denkbaren Störlastfällen?
2. Wie verhalten sich die komplexen Verbundwerkstoffe Stahlbeton und Spannbeton unter den gleichen Bedingungen?
3. Wie ist das Verhalten der Einzelwerkstoffe Beton, Bewehrungsstahl und Spannstahl und der Verbundwerkstoffe Stahlbeton und Spannbeton für extreme Betriebs- und Störfallzustände analytisch auf Basis des Experiments zu modellieren, um die sichere und wirtschaftliche Durchbildung von LNG-Behältern zu gestatten?

## 2. ZIEL DES FORSCHUNGSVORHABENS

Die Berechnung von Stahl- und Spannbetonkonstruktionen, die im Betrieb normalen Temperaturen unterliegen, erfolgt u.a. nach den einschlägigen Normen DIN 1045 und DIN 4227. Diese technischen Regelwerke verlieren für Bauteile, die sowohl im Betrieb als auch in Störfällen extrem tiefen Temperaturen ausgesetzt sind, ihre Gültigkeit, da sich nicht nur die Materialeigenschaften, sondern auch das Verbundverhalten völlig verändern. Damit ist es aber auch nicht mehr möglich, das Verformungsverhalten und den Zusammenhang zwischen Schnittgrößen und Verformungen auf der Basis bisherigen Wissens zutreffend analytisch darzustellen.

Das Forschungsvorhaben setzt sich daher zum Ziel, auf Grundlagen von Versuchen ein ingenieurmäßiges Berechnungsmodell der Verbundwerkstoffe Stahlbeton und Spannbeton auszuarbeiten, mit dem es gelingt, das Verhalten von Stahl- und Spannbetonbauteilen bei extrem tiefen Temperaturen sowohl unter den Beanspruchungen des Betriebes als auch von Störfällen zu beschreiben. Erst bei Vorliegen eines Berechnungs- und Bemessungsmodells wird es möglich, LNG-Behälter aus Stahlbeton oder Spannbeton nicht nur sicher sondern auch wirtschaftlich zu entwerfen.

### 3. VERSUCHSPROGRAMM

#### 3.1 Vorbemerkungen

Über die Eigenschaften der Baustoffe Beton, Bewehrungsstahl und Spannstahl bei extrem tiefen Temperaturen sind in den letzten Jahren umfangreiche Forschungsarbeiten veröffentlicht worden /6, 7, 8/. Vorliegende Forschungsarbeiten zum Verhalten von Stahlbeton- oder Spannbetonbauteilen bei extrem tiefen Temperaturen befassen sich i.w. mit Temperaturbeanspruchung wie örtlich begrenzter Temperaturschock u.ä. /9/. Zur Tragfähigkeit von Stahlbetonbauteilen bei tiefen Temperaturen liegen nur vereinzelte Arbeiten vor /10/, die mehr oder weniger gewisse Tendenzen aufzeigen.

Um experimentell begründete theoretische Modellvorstellungen über das Verhalten der Verbundwerkstoffe Stahlbeton und Spannbeton im Bauteil bei den geschilderten außergewöhnlichen Betriebs- und Störfallbedingungen von LNG-Behältern formulieren zu können, waren - gleichsam als Fundament - folgende Versuche unter Tieftemperaturbedingungen erforderlich:

1. Versuche zur Bestimmung der Tieftemperatureigenschaften der verwendeten Baustoffe
2. Versuche zur Bestimmung des inneren Zwanges in Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen infolge Abkühlung
3. Versuche zum Verbundverhalten
4. Versuche an Dehnkörpern zur Bestimmung der Dehnsteifigkeit und der Rißbildung
5. Versuche an Wandausschnitten zur Bestimmung des wirklichkeitsnahen Verformungsverhaltens, insbesondere unter Biegung mit Achszug

Nach Abschluß dieser Versuche und deren Auswertung kann auf dieser Grundlage eine theoretische Modellierung des Werkstoffverhaltens des Verbundwerkstoffes und die Ausarbeitung von Berechnungs- und Bemessungskriterien erfolgen.



Über die hier vorgenommene Änderung des Versuchsprogramms gegenüber unserem Forschungsantrag vom 05.10.1981 wurde bereits im 2. Zwischenbericht zu o.g. Forschungsvorhaben vom 18.06.1984 berichtet. Die Gründe, die zu dieser Änderung geführt haben sind dort dargestellt.

Im folgenden werden die einzelnen Programmpunkte näher erläutert.

### 3.2 Versuche zur Bestimmung der Tieftemperatureigenschaften der verwendeten Baustoffe

Die Veränderung der Materialeigenschaften für die einzelnen, wesentlichen Baustoffe der Verbundwerkstoffe Stahlbeton und Spannbeton durch tiefe Temperaturen ist, wie oben bereits geschildert, in zahlreichen Arbeiten dargestellt. Während für die Baustoffe Bewehrungsstahl und Spannstahl auf Grundlage dieser Arbeiten eine für den einzelnen Werkstoff (Stahlgüte) gültige Beschreibung der mechanischen Eigenschaften für den Tieftemperaturbereich gelingen kann, ist eine entsprechende allgemeingültige Beschreibung der Tieftemperatureigenschaften für den Werkstoff Beton noch nicht gelungen. Die Zusammensetzung jeder Betonmischung und die Lagerungsart der Betonkörper in der Zeit zwischen Betonage und Prüfung beeinflussen in erheblichem Maße die wesentlichen Einflußparameter wie W/Z-Faktor, momentaner Feuchtigkeitsgehalt, Porosität und Porenradienverteilung des Zementsteins, so daß ermittelte Materialgesetze für Beton im Tieftemperaturbereich nur für die untersuchte Betonart und die angewandte Lagerungsart eine allgemeine Gültigkeit besitzen.

Aus diesen Gründen war es zwingend erforderlich, die mechanischen Eigenschaften des verwendeten Konstruktionsbetons für den Bereich tiefer Temperaturen zu bestimmen. Bei allen weiterhin durchgeführten Versuchen wurden die Betonzusammensetzung und die Lagerungsart nicht mehr verändert.

Um die mechanischen Eigenschaften des verwendeten Betonstahls in vorliegende Versuchsergebnisse einordnen zu können, wurden stichpunktartig einige Tieftemperaturversuche durchgeführt.

Das Werkstoffverhalten von Beton und Stahl wurde in Druck- und Zugversuchen bei verschiedenen Temperaturen untersucht:  $\beta_c(t)$ ;  $\beta_{sz}(t)$ ;  $\sigma_b - \epsilon_b$ ; bzw.  $R_{p0,2}$ ;  $R_m$ ;  $\sigma_s - \epsilon_s$ ; Prüfalter des Betons  $> 100$  d. Weiterhin wurde das thermische Dehnverhalten der Werkstoffe für den Temperaturbereich  $+20^\circ\text{C} \leq t \leq -170^\circ\text{C}$  bestimmt.

### 3.3 Versuche zur Bestimmung des inneren Zwanges in Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen infolge Abkühlung

Für den Bereich normaler Temperaturen ist es im Stahl- und Spannbetonbau berechtigt, vom identischen Temperaturdehnverhalten des Betons und des mit ihm verbundenen Bewehrungsstahles auszugehen. Diese Voraussetzung muß für den Bereich sehr tiefer Temperaturen fallengelassen werden. Bild 3 zeigt das thermische Dehnverhalten eines Betons nach unterschiedlichen Lagerungsarten und eines Bewehrungsstahles für den Bereich tiefer Temperaturen. Das hier dargestellte Temperaturdehnverhalten kann als typisch bezeichnet werden, sowohl für alle gängigen Spann- und Bewehrungsstähle als auch für übliche Betonzusammensetzungen. Demnach bestehen zwischen den thermischen Dehnungen von Betonstahl und insbesondere von sehr feuchtem Beton bei tiefen Temperaturen beträchtliche Unterschiede. Diese Dehnungsdiskrepanzen werden aber in Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen durch den Verbund zwischen Beton und Stahl behindert. Der hieraus resultierende innere Zwang kann eine erhebliche Vorbelastung des Verbundes, zusätzliche Zugspannungen im Bewehrungs- oder Spannstahl (Selbstvorspannung) und entsprechende Druckspannungen im Beton hervorrufen.

Da zum Eigenspannungszustand in Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen bei Abkühlung nur erste Tastversuche /10/ vorliegen, sollten hier systematische Untersuchungen vorgenommen werden. Nach Bestimmung des Temperaturdehnverhaltens und der Spannungs-Dehnungs-

beziehung der Einzelbaustoffe bei tiefen Temperaturen wurden 1,0 m lange Betonzylinder mit mittig einbetoniertem Bewehrungsstab stufenweise bis  $-170^{\circ}\text{C}$  abgekühlt. Über die Aufzeichnung der Temperaturen und Dehnungen des Betons und des Bewehrungsstabes war es dann möglich, die Zwangsspannungen und die Verbundeinleitungsstrecke zu bestimmen. Der Versuchsaufbau und die Geometrie des Probekörpers ist in Bild 4 dargestellt.

### 3.4 Versuche zum Verbundverhalten

Die Verbundwerkstoffe Spannbeton und Stahlbeton beruhen auf der Voraussetzung des zuverlässigen Verbundes zwischen Bewehrungs- bzw. Spannstahl und dem diesen umgebenden Beton bzw. Einpreßmörtel. Dies gilt sowohl für den Betriebszustand als auch für den Grenzzustand der Tragfähigkeit.

Über das Zusammenwirken von Beton und Bewehrungsstahl (Verbundverhalten) bei tiefen Temperaturen liegen bisher nur wenige Forschungsergebnisse vor. Besonders die Klärung, ob die bei normalen Temperaturen übliche Beschreibung des Verbundes über eine Potenzfunktion, die von einer direkten Proportionalität zwischen der Verbundspannung bei einer bestimmten Stabverschiebung und der Betondruckfestigkeit ausgeht, auch auf den Tieftemperaturbereich übertragen werden darf, ist bisher noch nicht gelungen.

Die veränderten mechanischen Eigenschaften der Baustoffe im Bereich tiefer Temperaturen - besonders die Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt und der Porosität etc. /7/ - deuten darauf hin, daß im Tieftemperaturbereich eine Proportionalität zwischen Verbundfestigkeit und Betondruckfestigkeit nicht ohne weiteres vorausgesetzt werden kann. Weiter beanspruchen Eigenspannungen, die durch Unterschiede im thermischen Dehnverhalten der Baustoffe hervorgerufen werden, vgl. Abs. 3.3, den Verbund, so daß die funktionale Beschreibung der Verbundspannungen über die Stabendverschiebung für den Tieftemperaturbereich überprüft werden muß.

Das Verbundverhalten einbetonierter Bewehrungsstäbe wurde bei tiefen Temperaturen in Ausziehversuchen (pull-out-test) bestimmt. Die Versuchsanlage für die Verbunduntersuchungen ist in Bild 5 dargestellt. Neben der systematischen Veränderung der einmaligen Tieftemperaturbeanspruchung wurden zyklische Temperaturveränderungen untersucht. Da eine Vielzahl von Parametern die Verbundeigenschaften beeinflussen, wurde hier eine Auswahl getroffen, wobei die wesentlichen Parameter, wie Betongüte, Lagerungsart der Probekörper, Betonstahl, Betonüberdeckung, bei allen in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Versuchen in gleicher Weise berücksichtigt wurden.

### 3.5 Versuche an Dehnkörpern zur Bestimmung der Dehnsteifigkeit und der Rißbildung

Bei einer Leckage des Innentanks kann es zu einer örtlichen und plötzlichen Abkühlung des Wandbetons des Außentanks kommen, die als Kälteschock bezeichnet wird. Gleichzeitig wird der Außentank durch eine plötzliche Flüssigkeitsbelastung beansprucht.

Die Bemessung der Konstruktion für diesen inneren Störfall wird z.Z. mit einer Reihe von konservativen Rechenannahmen durchgeführt. Dabei wird die dynamische Beanspruchung durch einen Lastfaktor in eine statische überführt. Da bei der Berechnung i.d.R. die Erhöhung der Materialkenndaten infolge stoßartiger Belastung nicht berücksichtigt wird, bietet dieser Ansatz zwar eine zusätzliche Sicherheit, von der aber nicht bekannt ist, ob sie die anderen Unwägbarkeiten aufwiegt. Besonders die Frage wie die Bestimmung des dynamischen Lastfaktors, bei dessen Ermittlung die Veränderung der Steifigkeit infolge Rißbildung eine wesentliche Rolle spielt, für Stahl- bzw. Spannbetonbauteile bei gleichzeitiger Wirkung tiefer Temperaturen erfolgen könnte, ist heute noch unbekannt. Vor allem interessiert hier die Frage nach der Abminderung der Dehnsteifigkeit infolge Rißbildung bei tiefen bzw. normalen Temperaturen.

Um Aussagen über die Veränderung der Dehnsteifigkeit von Stahlbeton- bzw. Spannbetonbehältern machen zu können, sind Untersuchun-

gen über das Entstehen von Rissen und deren Entwicklung bis hin zum abgeschlossenen Rißbild an Stahlbetonbauteilen mit unterschiedlichen Bewehrungsgraden bei tiefen Temperaturen notwendig.

Durch diese Untersuchungen können die Rißbreiten und Rißabstände in Abhängigkeit von Bewehrungsart und -menge sowie der Temperatur bestimmt werden. Mit diesen Ergebnissen sowie mit den Ergebnissen aus den Verbunduntersuchungen ist eine für den Tieftemperaturbereich vollständige Beschreibung von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen unter Längszug bis hin zur Veränderung der Dehnsteifigkeit möglich. Diese Versuche simulieren das Verhalten jener Bereiche der zylindrischen Innenschale, die vorwiegend durch Ringzug infolge Füllung und Tieftemperatur beansprucht sind.

Es wurden zentrische Zugversuche an Stahlbeton-Dehnkörpern durchgeführt, die idealisierte Ausschnitte aus der Ringrichtung der Zylinderwand eines LNG-Behälters darstellen. An diesen Körpern konnte in vereinfachter Weise die Rißbildung und die Veränderung der Dehnsteifigkeit einer Schalenkonstruktion bei tiefen Temperaturen und Beanspruchung in Ringrichtung studiert werden. Um die Rißbildung und Rißweitenentwicklung bei tiefen Temperaturen in der geschlossenen Kältekammer messen zu können, mußten an definierten Stellen planmäßige künstliche Vorschäden (Querschnittsschwächungen) in den Dehnkörpern vorgesehen werden. Diese Vorschäden könnten aus bestimmungsgemäßem Betrieb herrühren, z.B. Risse infolge Temperaturzwang. Den Versuchsaufbau für die Dehnbalken zeigt Bild 6.

Die Versuchsvariablen waren die Prüftemperatur, der Bewehrungsgrad und der Durchmesser der Bewehrungsstäbe. Die Prüfkörper wurden in einer Kältekammer so langsam auf die vorgesehene Temperatur ( $-100^{\circ}\text{C}$ ,  $-170^{\circ}\text{C}$ ) abgekühlt, daß die Eigenspannungen aus Temperaturdifferenzen vernachlässigbar gering blieben. Sobald der Prüfkörper eine homogene Temperatur aufwies, wurde er in der Kältekammer stufenweise belastet. Während der Versuchsdurchführung

wurden die Temperaturverteilung, die Beton- und Stahldehnungen, die Rißbreiten und Rißanzahl bis zum abgeschlossenen Rißbild aufgezeichnet.

### 3.6 Versuche an Wandausschnitten zur Bestimmung des wirklichkeitsnahen Verformungsverhaltens, insbesondere unter Biegung mit Achszug

Der Innenbehälter wird bei Inbetriebnahme langsam und kontrolliert "kaltgefahren", wobei sich der Behälter insgesamt zusammenzieht, ohne daß ein nennenswerter Temperaturgradient über die Bauteildicke entsteht. Damit ist er frei von Systemzwang infolge von Tieftemperatur. Die Beanspruchung der Schalenkonstruktion erfolgt i.w. durch die (LNG-)Flüssigkeitsfüllung.

Der Außenbehälter steht im Regelbetrieb unter Normaltemperatur. Durch eine Leckage des Innentanks wird er jedoch schockartig auf seiner Innenseite abgekühlt. Man muß im ungünstigsten Fall davon ausgehen, daß sich der Inhalt des Innentanks in den Ringspalt ergießt. In diesem Störfall muß aber der Außentank, auch bei begrenzter Rißbildung, in der Lage sein, das Austreten von LNG, in flüssiger oder gasförmiger Phase, zu unterbinden.

Wie sich jedoch ein Wandausschnitt unter Biegung und Längszug bei Tieftemperatur verhält, ist z.Z. völlig unbekannt. Dies gilt sowohl für den Außenbehälter einer LNG-Tankanlage als auch für einen Spannbetoninnenbehälter.

Bei den durchgeführten Versuchen wurden zwei charakteristische Bereiche der zylindrischen Stahlbeton- oder Spannbetonwand eines LNG-(Innen-)Behälters untersucht, die bei Berücksichtigung der vorgenommenen Idealisierungen das Verhalten sowohl des Außentanks wie des Innentanks treffend beschreiben. Die Wände wurden idealisiert als Ringelement betrachtet und die Beanspruchung in Richtung der Wandhöhe außer acht gelassen.

- Wandbereich A

In einem gewissen Abstand von der Fußeinspannung entstehen in der Außenschale infolge LNG-Flüssigkeitsdruck (innerer Störfall) nur Ringzugkräfte bzw. infolge Vorspannung nur Ringdruck. Zu diesen Normalkräften tritt Ringbiegung infolge des Temperaturzwanges, so daß in diesem Bereich die Außenwand durch Biegung und Längskraft beansprucht wird. Eine entsprechende Beanspruchung erfährt die Innenschale in Nähe der Fußeinspannung, Biegung infolge Einspannung und Längskraft infolge LNG-Flüssigkeitsdruck.

- Wandbereich B

Am Fuß der Wände des zylindrischen Innentanks und des Außentanks treten infolge LNG-Flüssigkeitsdruck keine wesentlichen Ringkräfte sondern nur Längsbiegemomente auf. Für den Innentank liegt ein Betriebslastfall und für den Außenbehälter ein Störfall vor. Zu diesen Beanspruchungen ist beim Außentank noch Ringbiegung und Ringzug infolge des Temperaturzwanges zu berücksichtigen.

Die Art der Beanspruchung in Ringrichtung in der Zylinderwand erlaubte die ebene Darstellung als Plattenstreifen im Versuch. In Anbetracht der Vielzahl an möglichen Beanspruchungszuständen - Lasten, Temperaturen, Zwängungen - und an möglichen Ausbildungen der Stahlbeton- und Spannbetonbalken war bei der verhältnismäßig geringen Versuchskörperanzahl nur eine punktuelle Problemklärung möglich.

Da die Beanspruchung des Außenbehälters bei inneren Störfällen infolge Temperaturzwang erst kürzlich in /9/ umfassend untersucht wurde, sollte hier vorrangig das Vorformungsverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen unter Biegung mit und ohne Achszug bei tiefen Temperaturen experimentell studiert werden. Dazu wurden Wandausschnitte eigenspannungsfrei abgekühlt und dann durch äußere Lasten - Biegung und Längskraft - beansprucht. Der Versuchsaufbau ist in Bild 7 dargestellt. Die im realen Bauwerk vorliegenden

Zwängungen der Außenschale konnten zum einen im Versuch durch äußere Kräfte simuliert werden, zum anderen im analytischen Teil mit Ergebnissen aus /9/ durch Superposition berücksichtigt werden.

Die Prüfkörper für die Versuche zur Bestimmung des wirklichkeitsnahen Verformungsverhaltens von Wandausschnitten, insbesondere unter Biegung mit Achszug bei tiefen Temperaturen, wurden als Stahlbetonbalken ausgebildet. An diesen Körpern konnte in vereinfachter Weise die Biegerißbildung und die Momenten-Krümmungs-Beziehung sowie die Veränderung der Biegesteifigkeit einer Schalenkonstruktion bei tiefen Temperaturen festgestellt werden. Die Versuchsvariablen waren die Prüftemperatur, die äußere Belastung, der Bewehrungsgrad und der Durchmesser der Bewehrungsstäbe. Sobald der Prüfkörper nach der Abkühlung in einer Kältekammer ein homogenes Temperaturfeld aufwies, wurde er stufenweise belastet. Während der Versuchsdurchführung wurde die Temperaturverteilung, die Beton- und Stahldehnungen, die Durchbiegungen, die Rißbreiten und Rißanzahl bis zum abgeschlossenen Rißbild aufgezeichnet.

Um die Rißbildung und Rißweitenentwicklung bei tiefen Temperaturen auch innerhalb der geschlossenen Kältekammer messen zu können, mußten an definierten Stellen planmäßig künstliche Vorschäden (Querschnittsschwächungen) in den Biegebalken vorgesehen werden. Diese Vorschäden könnten aus Temperaturzwängungen o.ä. herrühren.

### 3.7 Entwicklung eines ingenieurmäßigen Berechnungsmodells für Stahl- und Spannbeton bei sehr tiefen Temperaturen

Nach Auswertung und analytischer Darstellung sowohl des Verhaltens der Einzelwerkstoffe Beton, Spannstahl und Bewehrungsstahl als auch des Verbundverhaltens ist es möglich, das Verhalten des Verbundbaustoffs zu beschreiben. Die funktionale Darstellung der mechanischen Eigenschaften der verwendeten Baustoffe bei tiefen Temperaturen beinhaltet, unter Berücksichtigung vorliegender Parameter, folgende Materialkennwerte:



Beton

$\beta_c(\vartheta)$ ;  $\beta_{sz}(\vartheta)$ ;  $E_b(\vartheta)$ ;  $\epsilon_{bn}(\vartheta)$ ;  $\alpha_b(\vartheta)$

sowie die Abhängigkeit der Kennwerte von der Betonfestigkeit

Stahl

$R_{p0,2}(\vartheta)$  bzw.  $\beta_s(\vartheta)$ ;  $R_m(\vartheta)$ ;  $E_s(\vartheta)$ ;  $\alpha_s(\vartheta)$

Auf Grundlage der Versuche zur Bestimmung des inneren Zwanges infolge Abkühlung und der Verbunduntersuchungen werden folgende Spannungen analytisch dargestellt:

Verbund

$$\tau_v(\vartheta), \tau_v(\vartheta) = f[\beta_c(\vartheta)], \tau_v(\vartheta) = f(v)$$

innerer Zwang

$$\sigma_s = f[\alpha_b(\vartheta); \alpha_s(\vartheta); E_b(\vartheta); E_s(\vartheta)]$$

$$\sigma_b = f(\sigma_s)$$

Mit Hilfe der analytischen Darstellung des Materialverhaltens bei tiefen Temperaturen wird es möglich, ein ingenieurmäßiges Modell zur Berechnung von streifen- bzw. stabförmigen Elementen aus Stahlbeton und Spannbeton zu formulieren. Die Eignung dieses Berechnungsmodells, das den Zusammenhang zwischen den Schnittgrößen Biegemoment und Längskraft einerseits sowie Krümmung und Dehnung andererseits beschreibt, wird mit den Versuchen an Dehnkörpern und Biegebalken überprüft. Dabei war die zutreffende analytische Ermittlung der folgenden Versuchsergebnisse von besonderer Wichtigkeit:

Einfluß der Temperatur auf Rißbreiten und Rißabstände bei Längszug, Biegung und Biegung mit Längszug

Änderung der Dehn- und Biegesteifigkeit durch Rißbildung bei tiefen Temperaturen

Einfluß der Temperatur auf die Momenten-Krümmungs-Beziehung bzw.  $N-\epsilon_m$ -Beziehung

#### 4. GLIEDERUNG DES FORSCHUNGSBERICHTES

Wie in Abs. 3 beschrieben, besteht dieses Forschungsvorhaben aus einem umfangreichen experimentellen Teil und einem auf diesen aufbauenden analytischen Teil. Die durchgeführten Versuche bilden zwar thematisch und zielgerichtet eine Einheit, können aber trotzdem in einzelne Abschnitte unterteilt werden, wie hier stichpunktartig in: Baustoffuntersuchungen, Versuche zum inneren Zwang, Ausziehversuche, Dehnkörper, Versuche zum Biegeverhalten. Um eine größere Transparenz und eine bessere Übersichtlichkeit der hier durchgeführten Versuche und der ermittelten Versuchsergebnisse zu gewähren, wurde der Forschungsbericht entsprechend der thematischen Abgrenzung in 7 Teile unterteilt:

Teil 1: Problemstellung und Versuchsprogramm

Teil 2: Tieftemperatureigenschaften der verwendeten Baustoffe

Teil 3: Innerer Zwang in Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen  
infolge Abkühlung

Teil 4: Verbundspannungen bei tiefen Temperaturen

Teil 5: Dehnsteifigkeit und Rißbildung bei tiefen Temperaturen

Teil 6: Verformungsverhalten von Wandausschnitten bei tiefen  
Temperaturen

Teil 7: Berechnungsmodell für Stahl- und Spannbeton bei sehr  
tiefen Temperaturen

Der 1. Teil gibt für alle weiteren Teile eine allgemein gültige Einleitung und stellt das Programm und die Ziele des Forschungsvorhabens vor. Die Teile 2 bis 6 beinhalten den experimentellen Teil dieser Arbeit. In ihnen werden die Versuchseinrichtungen und Versuchsergebnisse dargestellt und erste funktionelle Beschreibungen angeboten. Im 7. Teil wird, aufbauend auf den Versuchsergebnissen, ein Berechnungsmodell entwickelt, das anhand der durchgeführten Bauteilversuche überprüft wird.

## 5. LITERATUR

- /1/ Bruggeling, A.S.G.: Concrete storage vessels. State of the art report. Delft, Sept. 1979
- /2/ Bomhard, H.: Beton für Behältersysteme zur Speicherung flüssiger Gase - Wirklichkeiten, Möglichkeiten und Grenzen. Vortrag zum Deutschen Betontag 1981
- /3/ Preliminary recommendations for the design of prestressed concrete containment structures for the storage of refrigerated liquefied gases (RLG). FIP-Guide to Good Practice, Sept. 1982
- /4/ Hohberg, J.-M.: Flüssiggasbehälter aus Spannbeton. Diplomarbeit. TU Berlin 1980
- /5/ Proceedings of Second International Conference on Cryogenic Concrete. Amsterdam, Netherlands. Okt. 1983
- /6/ Cryogenic behaviour of materials for prestressed concrete. FIP-State of art report, May 1982
- /7/ Wiedemann, G.: Zum Einfluß tiefer Temperaturen auf Festigkeit und Verformung von Beton. Diss. TU Braunschweig, 1982
- /8/ Rostásy, F.S., Scheuermann, J., Wiedemann, G.: Verhalten von Spann- und Bewehrungsstahl bei tiefen Temperaturen. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 2/82 und 3/82
- /9/ Schäper, M.: Tieftemperaturbeanspruchte Spannbetonbehälter - Sicherheitsbehälter für verflüssigte Gase. Diss. Universität Essen, 1984
- /10/ Wiedemann, G., Scheuermann, J., Kordina, K., Rostásy, F.S.: Versuche zur Biegetragfähigkeit von Stahlbetonplattenstreifen bei extrem tiefer Temperatur. Abschlußbericht Forschungsauftrag V 198/DAfStb, 1983

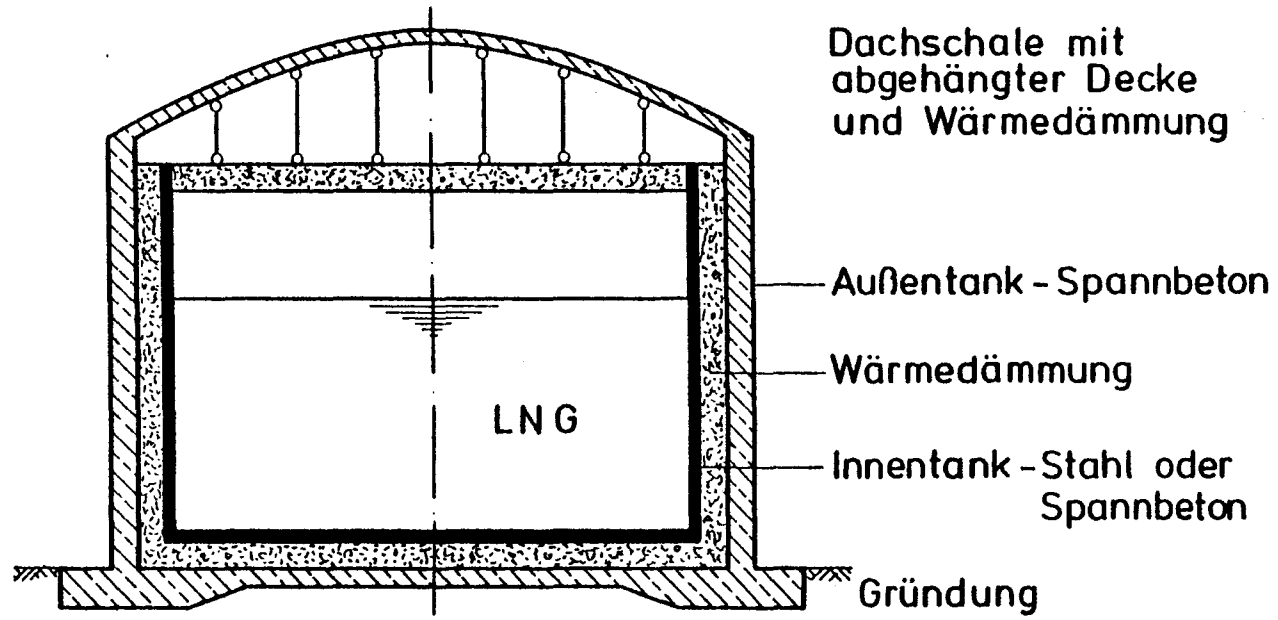
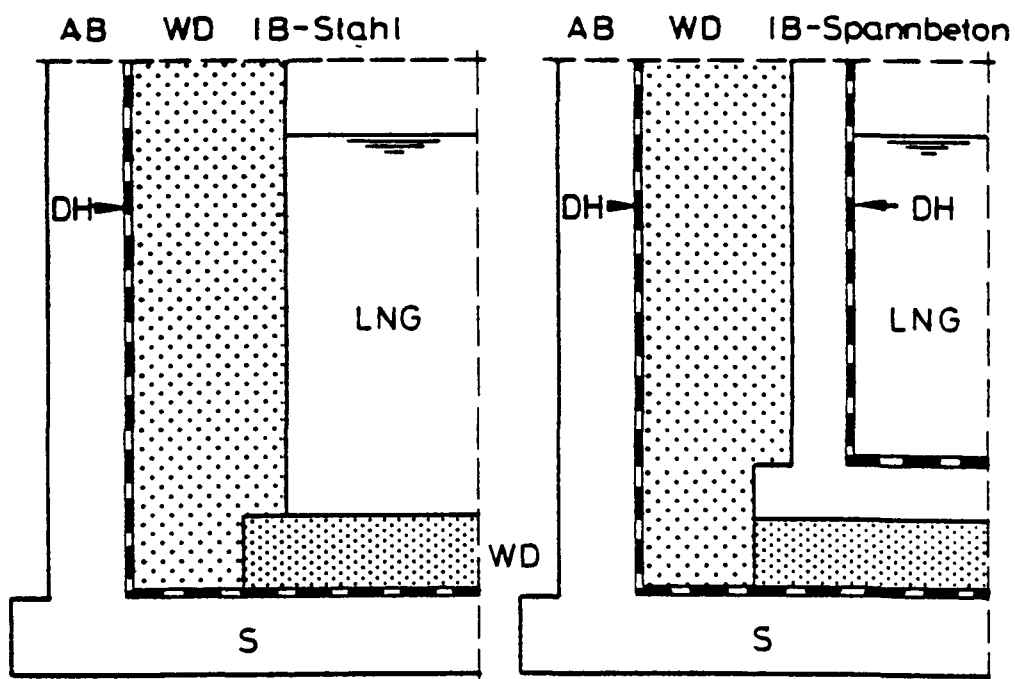


Bild 1: Aufbauschema eines LNG-Lagerbehälters



AB-Spannbetonaußentank ; IB-Innenbehälter ;  
S-Sohlplatte ; WD-Wärmedämmung ; DH-Dichthaut

Bild 2: Ausschnitte der Bodenbereiche von LNG-Doppel-  
manteltanks (schematisch)

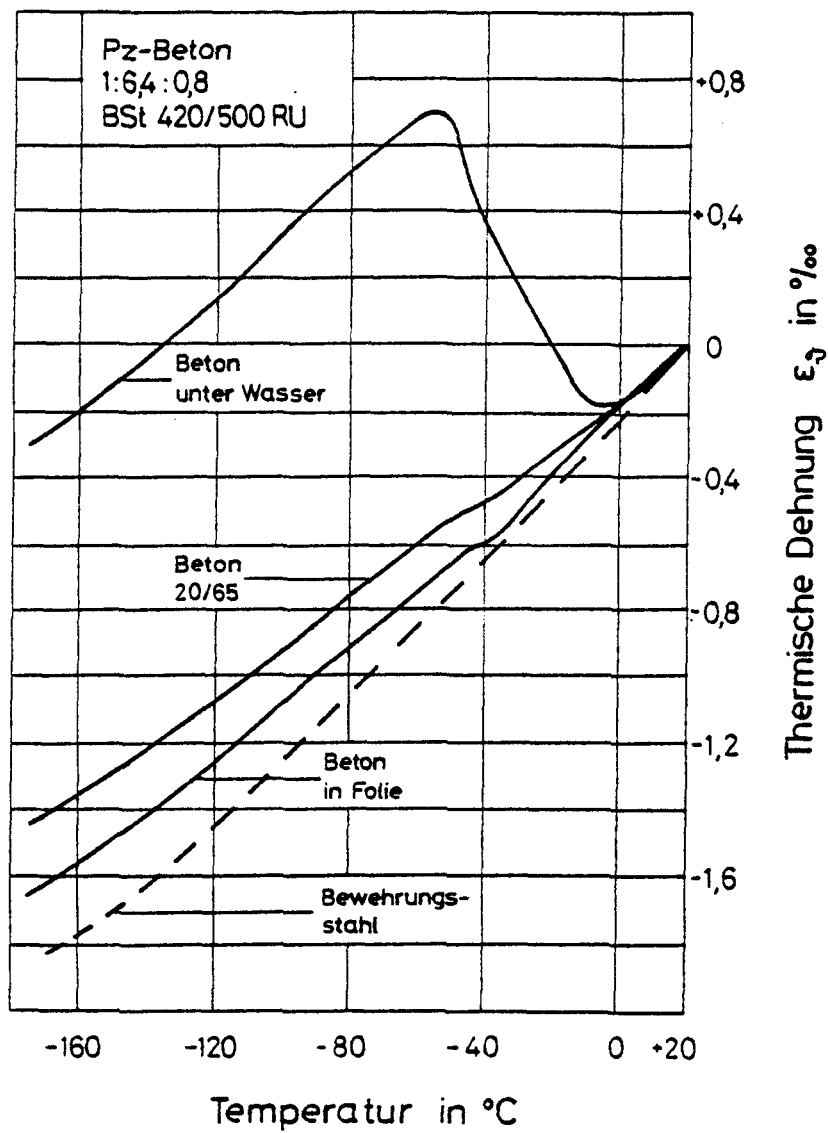


Bild 3: Thermische Dehnung von Beton nach unterschiedlicher Lagerungsart und von Bewehrungsstahl

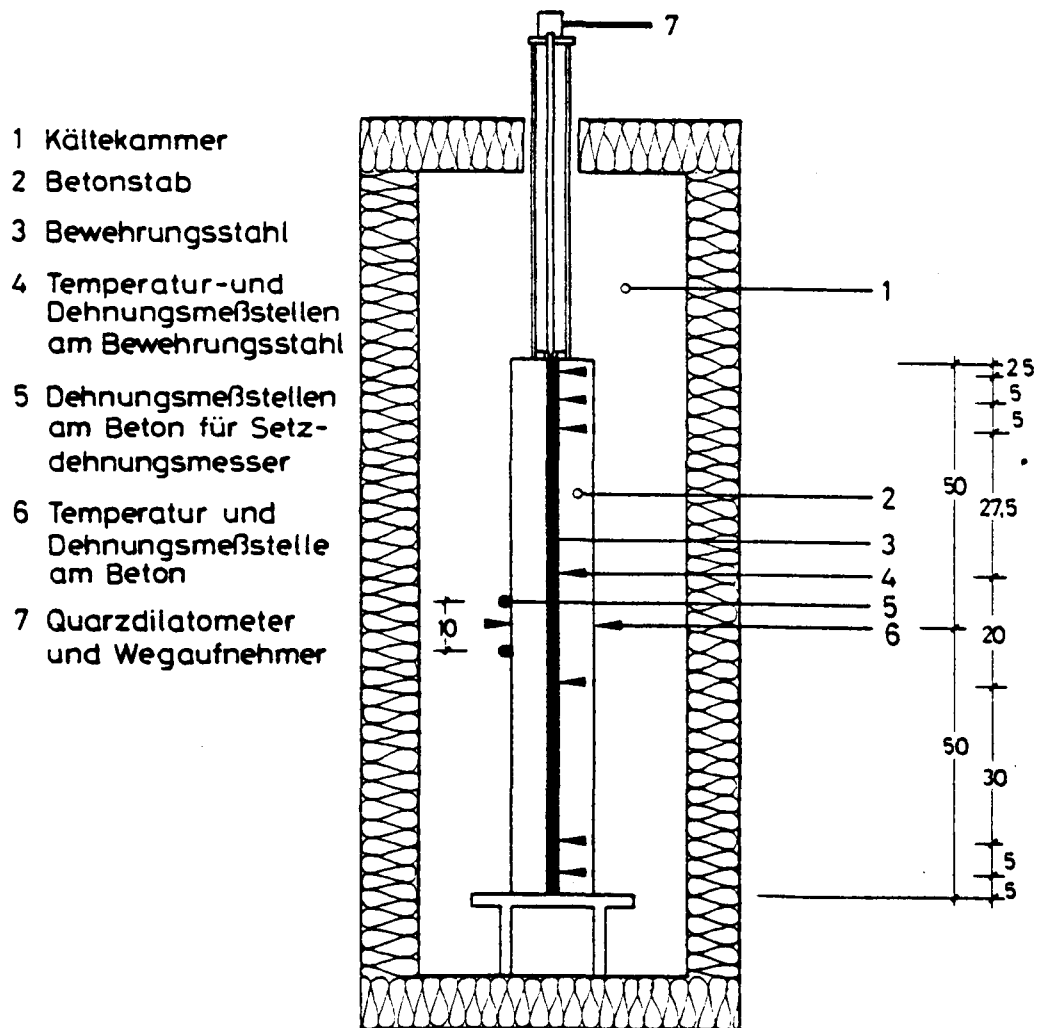


Bild 4: Versuchsaufbau und Meßstellen für die Versuche zur Bestimmung der Eigenspannungen infolge Abkühlung

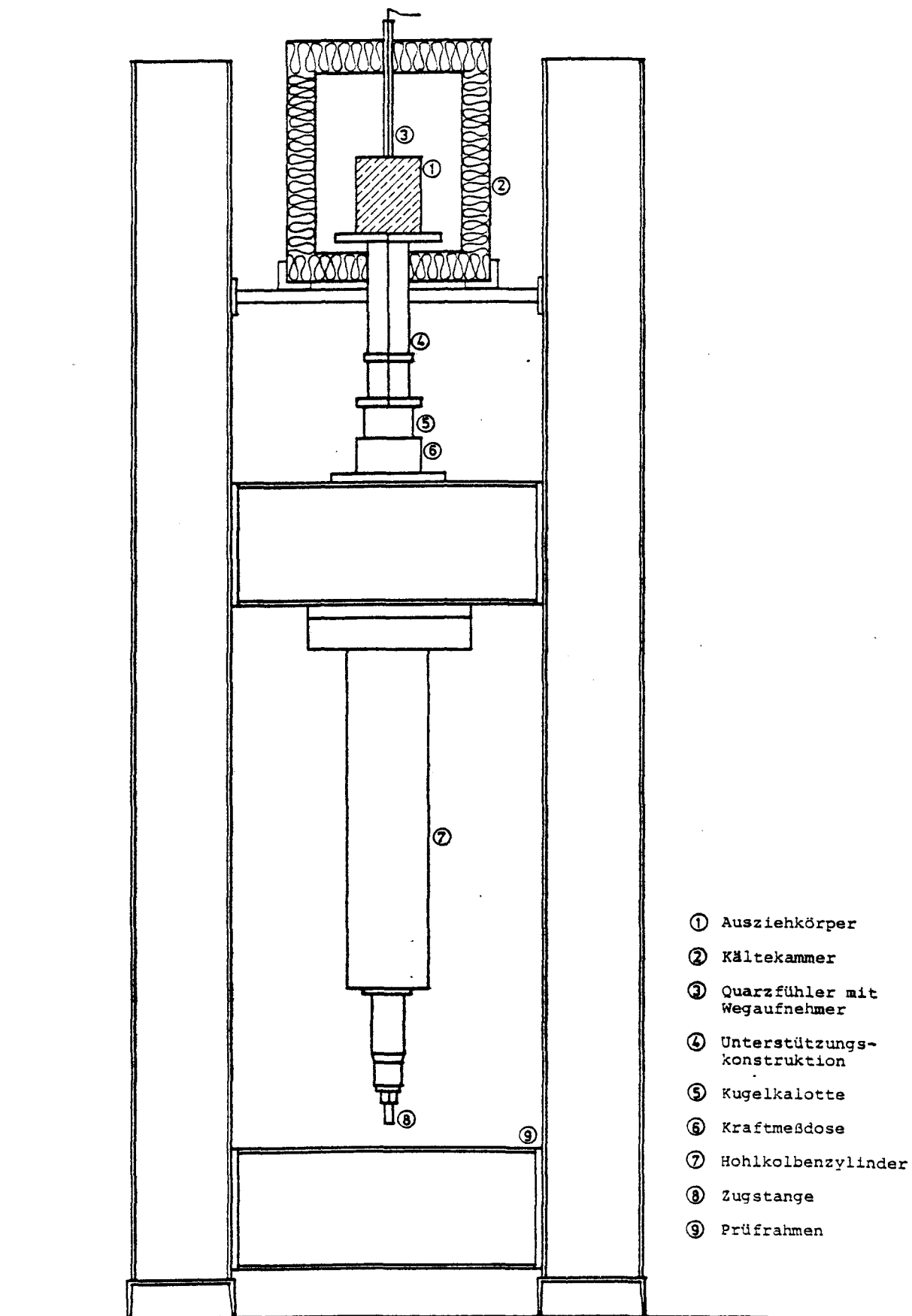


Bild 5: Versuchsstand für Ausziehversuche bei tiefen Temperaturen



- 1 Dehnkörper
- 2 Zugglied
- 3 Hydraulische Presse
- 4 Kugelkalotte mit Kraftmeßdose
- 5 Prüfrahmen mit biegesteifen Konsolen
- 6 Kältekammer

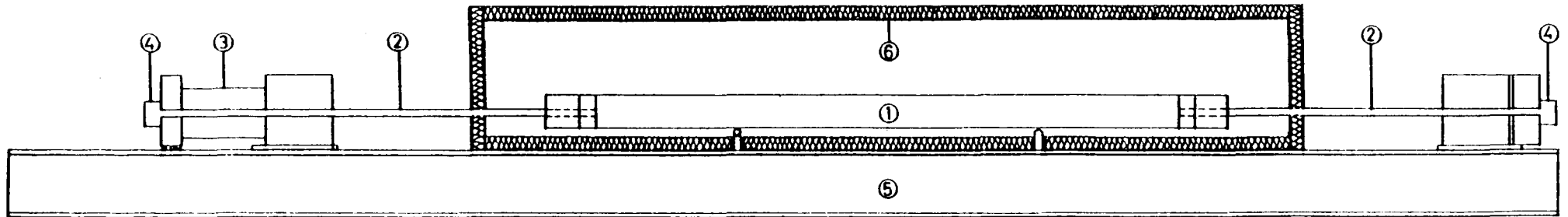


Bild 6: Versuchsaufbau für Dehnkörper

- 1 Wandausschnitt (Biegebalken)
- 2 Zugglied
- 3 Hydraulische Presse
- 4 Kugelkalotten mit Kraftmeßdosen
- 5 Prüfrahmen mit biegesteifen Konsolen
- 6 Kältekammer

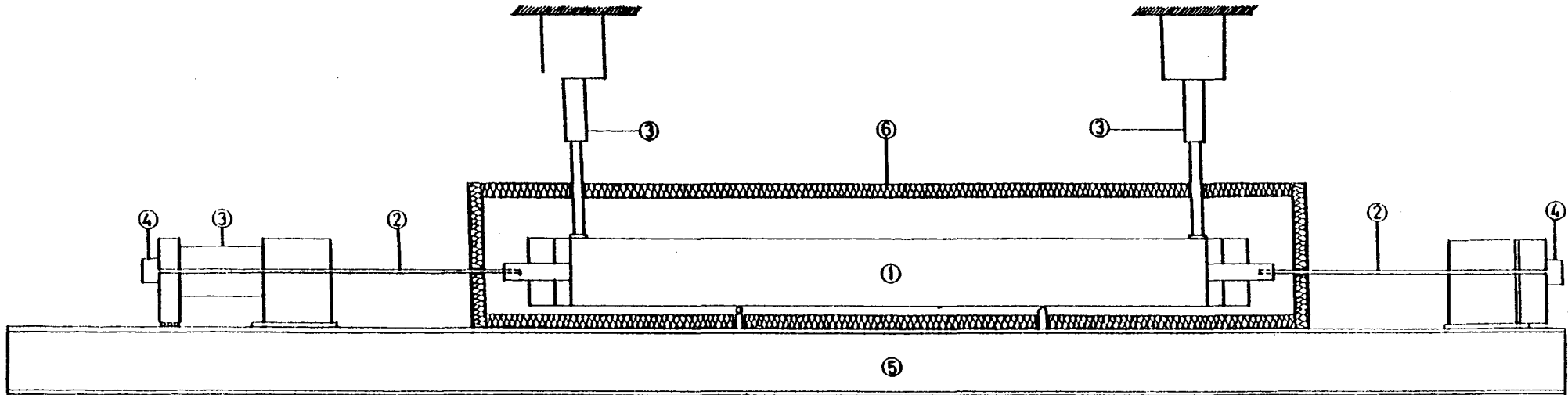


Bild 7: Versuchsaufbau für Wandausschnitte bei Biegung mit Achszug

PROF. DR.-ING. F. S. ROSTÁSY  
Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz  
Lehrstuhl für Baustoffkunde und Stahlbetonbau

TECHNISCHE UNIVERSITÄT  
BRAUNSCHWEIG

3300 Braunschweig, den 20.12.1984

## INGENIEURMÄSSIGES BERECHNUNGSMODELL FÜR STAHL- UND SPANNBETON BEI SEHR TIEFEN TEMPERATUREN

### Teil 2: Tieftemperatureigenschaften der verwendeten Baustoffe

### F o r s c h u n g s b e r i c h t

Prof. Dr.-Ing. F.S. Rostásy

Dipl.-Ing. J. Scheuermann

Dezember 1984

Gefördert von der Stiftung Volkswagenwerk

Az.: I/38 044

Postsendungen:  
3300 Braunschweig, Beethovenstraße 52  
Fernschreiber: 9 52 698 ibstb d  
Erfüllungsort und Gerichtsstand Braunschweig

Fernsprecher:  
331 5421  
Ortskennzahl 0531  
Kommt keine Verbindung zustande  
bitte 331 5431 wählen

Besuchszeiten:  
Montag bis Freitag 9 - 16 Uhr

# Ingenieurmäßiges Berechnungsmodell für Stahl- und Spannbeton bei sehr tiefen Temperaturen

## Gliederung

- Teil 1      Problemstellung und Versuchsprogramm
- Teil 2      Tieftemperatureigenschaften der verwendeten Baustoffe
- Teil 3      Innerer Zwang in Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen  
infolge Abkühlung
- Teil 4      Verbundspannungen bei tiefen Temperaturen
- Teil 5      Dehnsteifigkeit und Rißbildung bei tiefen Temperaturen
- Teil 6      Verformungsverhalten von Wandausschnitten bei tiefen  
Temperaturen
- Teil 7      Berechnungsmodell für Stahl- und Spannbeton bei  
sehr tiefen Temperaturen

## Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG
2. VERSUCHSPROGRAMM
3. MATERIALKENNWerte VON BETON BEI TIEFEN TEMPERATUREN
  - 3.1 Baustoffe und Probekörper
  - 3.2 Versuchsdurchführung
  - 3.3 Ergebnisse der Betonversuche
  - 3.4 Beschreibungsmöglichkeit der mechanischen Kennwerte von Beton für den Bereich tiefer Temperaturen
4. MATERIALKENNWerte VON BEWEHRUNGSSTAHL BEI TIEFEN TEMPERATUREN
  - 4.1 Baustoffe und Probekörper
  - 4.2 Versuchsdurchführung
  - 4.3 Versuchsergebnisse
  - 4.4 Beschreibungsmöglichkeit der mechanischen Kennwerte von Bewehrungsstahl für den Bereich tiefer Temperaturen
5. ZUSAMMENFASSUNG
6. LITERATUR

## 1. EINLEITUNG

Mit der Planung und Erstellung großer Lagerbehälter für verflüssigtes Erdgas (LNG) wurden weltweit große Anstrengungen unternommen, um das Materialverhalten der hier verwendeten Baustoffe für den Bereich tiefer Temperaturen zu erforschen. Zum heutigen Zeitpunkt kann man davon ausgehen, daß das mechanische Verhalten der im LNG-Behälterbau üblicherweise verwendeten Baustoffe - kaltzäher Baustahl, Beton, Bewehrungsstahl, Spannstahl - auch für den Tieftemperaturbereich weitgehend bekannt ist. Die wesentlichen Forschungsergebnisse sind in den Arbeiten [1 bis 3] zusammengefaßt.

Die vorliegende Forschungsarbeit befaßt sich mit dem Tragverhalten von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen bei tiefen Temperaturen. Die Veränderung der Materialeigenschaften für die einzelnen, wesentlichen Baustoffe der Verbundwerkstoffe Stahlbeton und Spannbeton unter dem Einfluß tiefer Temperaturen ist, wie oben bereits geschildert, in zahlreichen Arbeiten dargestellt.

Für die Baustoffe Bewehrungsstahl und Spannstahl kann auf der Grundlage dieser Arbeiten eine für den einzelnen Werkstoff (Stahlgüte) gültige Beschreibung der mechanischen Eigenschaften für den Tieftemperaturbereich gelingen. Somit waren für den Baustoff Betonstahl nur einige wenige stichpunktartige Tieftemperaturversuche erforderlich, um mit diesen die so ermittelten mechanischen Eigenschaften des Betonstahles in vorliegende Versuchsergebnisse einordnen zu können.

Auf der Grundlage der vorliegenden Forschungsergebnisse kann für den Werkstoff Beton eine entsprechende allgemein gültige Beschreibung der Tieftemperatureigenschaften noch nicht gelingen. Die Zusammensetzung jeder Betonmischung

und die Lagerungsart der Betonkörper in der Zeit zwischen Betonage und Prüfung beeinflussen in erheblichem Maße die für die Tieftemperatureigenschaften wesentlichen Parameter. Diese sind v.a.: W/Z-Faktor, momentaner Feuchtigkeitsgehalt, Porosität und Porenradienverteilung. Somit können ermittelte Materialgesetze für den Beton im Tieftemperaturbereich nur für die untersuchte Betonart und die angewandte Lagerungsart eine allgemeine Gültigkeit besitzen. Daher war es zwingend erforderlich, die mechanischen Eigenschaften des verwendeten Konstruktionsbetons für den Bereich tiefer Temperaturen detailliert zu bestimmen.

Damit bei allen weiteren durchgeführten Versuchen die hier ermittelten Tieftemperatureigenschaften der Baustoffe als Grundlage dienen konnten, wurde die Stahlart, die Betonzusammensetzung und die Lagerungsart nicht mehr verändert.

## 2. VERSUCHSPROGRAMM

Bei den vorgesehenen Untersuchungen zum Verbundverhalten zwischen Beton und Bewehrungsstahl und zum Tragverhalten von Stahlbetonbauteilen bei tiefen Temperaturen bestand die Schwierigkeit, eine Betonsorte auszuwählen, die zum einen einen direkten Vergleich zu den baupraktisch verwendeten Betonen erlaubt, zum anderen bei den vorgesehenen Versuchen unter Berücksichtigung vorhandener Prüfzylinderkapazitäten noch die Beobachtung des Bruchversagens ermöglicht.

Aus diesen Gründen wurde für die geplanten Bauteiluntersuchungen eine Betonsorte festgelegt, die in ihrem thermischen Dehnverhalten bei Normallagerung (20 °C/65 % rel. Feuchte) und bei versiegelter Lagerung dem eines Konstruktionsbetons B 45 entspricht, im Gegensatz zu diesem Konstruktionsbeton bei Raumtemperatur aber eine geringere Druckfestigkeit, ca. B 25, aufweist. Bei den hier durchgeführten Materialuntersuchungen wurde sowohl ein baupraktisch üblicher Beton B 45 als auch der o. g. Beton B 25 geprüft. Um die Anzahl der Einflußgrößen auf die Tieftemperatureigenschaften der untersuchten Betone zu begrenzen, wurde bei der Herstellung dieser Betone auf die Verwendung von Betonzusatzmitteln verzichtet.

Das Festigkeits- und Verformungsverhalten der Baustoffe wurde bei Raumtemperatur (RT) und unterschiedlichen Tieftemperaturen (TT) untersucht. Dazu wurden die Baustoffproben mit konstanter Abkühlgeschwindigkeit eigenspannungsfrei auf die vorgesehene Prüftemperatur gebracht und dann in Druck- und Zugversuchen die temperaturabhängigen Festigkeiten und Spannungs-Dehnungs-Beziehungen aufgezeichnet. Weiterhin wurde das thermische Dehnverhalten der Werkstoffe für den Temperaturbereich + 20 °C bis - 170 °C bestimmt.



Bekanntlich übt der Feuchtigkeitsgehalt des Betons einen entscheidenden Einfluß auf das Tieftemperaturverhalten des Betons aus. Deshalb wurden drei Arten der Vorlagerung der Betonprobekörper bis zur Prüfung im Alter von rd. 100 d untersucht:

- a) Lagerung im Klimaraum bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte;
- b) Lagerung bei 20 °C in versiegeltem Zustand;
- c) Lagerung unter Wasser.

Für Beton- und Spannstähle sind derart umfangreiche Versuche mit unterschiedlicher Vorlagerung naturgemäß nicht notwendig. Die mechanisch-technologischen Eigenschaften wurden daher bei RT und TT vergleichend geprüft.

### 3. MATERIALKENNWERTE VON BETON BEI TIEFEN TEMPERATUREN

#### 3.1 Baustoffe und Probekörper

Zur Herstellung der Betone wurde Portlandzement PZ 35 F verwendet. Die Zuschlagstoffe (Kies aus Vienenburg) wurde in 3 Korngruppen mit einem Größtkorn von 16 mm zugegeben, wobei eine Sieblinie zwischen B<sub>16</sub> und C<sub>16</sub> angestrebt wurde. Die Mischungsverhältnisse, Zusammensetzungen und Würfeldruckfestigkeiten der untersuchten Betone (ca. B 25 und B 45) sind in Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1: Zusammensetzung der untersuchten Betone

	B 25	B 45
Mischungsverhältnis (Zement : Zuschlag : Wasser in Gewichtsteilen)	1 : 6,4 : 0,8	1 : 5,4 : 0,6
Zementgehalt	300 kg/m <sup>3</sup>	340 kg/m <sup>3</sup>
Zuschlag in GT 0/ 2 mm	50 %	30 %
2/ 8 mm	40 %	48 %
8/16 mm	10 %	22 %
Würfeldruckfestigkeiten nach 28 Tagen bei Versuchsdurchführung	30 N/mm <sup>2</sup> 36 N/mm <sup>2</sup>	52 N/mm <sup>2</sup> 56 N/mm <sup>2</sup>

Um eine möglichst homogene Temperaturverteilung innerhalb der Probekörper zu gewährleisten und Temperaturspannungen infolge von Temperaturgradienten im Probekörper klein zu halten, wurde eine zylindrische Probengeometrie gewählt:  $\varnothing$  8 cm und h = 30 cm. Diese Probekörper wurden in Stahlschalungen hergestellt. Nach dem Ausschalen lagerten sie 7 Tage unter feuchten Tüchern und wurden dann durch Sägen und Schleifen in Abschnitte von h = 16 cm

und 8 cm geteilt. Anschließend wurden die Probekörper entsprechend den vorgesehenen Lagerungsbedingungen bei + 20 °C und 65 % rel. Feuchte, in Folie und unter Wasser mehr als 100 Tage bis zur Versuchsdurchführung gelagert. Die Lagerung bei + 20 °C und 65 % rel. Feuchte wird im folgenden als Normallagerung bezeichnet. Durch die Versiegelung der Proben mit Folien wurde ein Zustand für die Probekörper erreicht, wie er auch in massigen Bauteilen vorliegt. Der ursprüngliche Wassergehalt der versiegelten Proben bleibt unverändert. Die Wasserlagerung der Probekörper ist als extremer möglicher Zustand gegensätzlich zur Normallagerung anzusehen.

Die Druckfestigkeit wurde an zylindrischen Probekörpern von 8 cm Durchmesser und 16 cm Höhe ermittelt; die Spaltzugfestigkeit an Körpern von 8 cm Durchmesser und 8 cm Länge. Das Temperaturdehnverhalten wurde ebenso wie die Druckfestigkeit an Proben mit 8 cm Durchmesser und 16 cm Höhe bestimmt.

### 3.2 Versuchsdurchführung

Die Temperaturbeanspruchung wurde in einer Kältekammer aufgebracht, in der mit einstellbarer Abkühl- bzw. Erwärmungsgeschwindigkeit beliebige Temperaturen zwischen - 196 °C und + 20 °C erzeugt werden können. Das Kühlmedium war Flüssigstickstoff, der mit Hilfe eines Propellers im Kühlraum zerstäubt wurde. Um Beanspruchungen der Proben durch Eigenspannungen, die aus großen Temperaturdifferenzen zwischen Probenoberfläche und Probenmitte resultieren können, so weit wie möglich zu vermeiden, wurde die Abkühlgeschwindigkeit bei den Betonproben auf max. 1,0 °C/min begrenzt. Die maximale Temperaturdifferenz zwischen Probenoberfläche und Probenmitte betrug ca. 10 °C (Proben: Ø 8 cm, h = 16 cm). Die hieraus resultierenden Eigenspannungen sind gering und können daher nur einen untergeordneten Einfluß auf die Versuchsergebnisse ausüben. Nach Erreichen der vorgesehenen Kammertemperatur wurde diese so lange konstant gehalten, ca. 1,0 bis 2,0 Std., bis

eine vollständige Temperaturhomogenisierung der Probekörper erreicht war.

Zur Kraftaufbringung bei den Druck- und Spaltzugversuchen wurden stählerne Druckstempel durch Öffnungen im Boden und in der Decke der Kühlkammer geführt. Zwischen die Druckstempel und die Stirnenden der Probekörper wurde bei den Druckversuchen zur Wärmedämmung 1 mm dicke Pappschichten gelegt. Bei den Spaltzugversuchen befanden sich zwischen Druckplatte und Mantelflächen des Probekörpers 10 mm breite und 5 mm dicke Filzstreifen.

Zur Aufnahme der Spannungs-Dehnungs-Linien war jeder Probekörper mit 3 tieftemperaturgeeigneten CuNi-Dehnmeßstreifen bestückt, die in halber Körperhöhe und über den Umfang im Winkel von  $120^\circ$  angeordnet waren. Die Temperaturkompensation wurde mit Hilfe eines weiteren Probekörpers erreicht, der ebenfalls mit 3 Dehnmeßstreifen (DMS) beklebt war und direkt neben dem zu prüfenden Körper in der Kammer stand. Die Steuerung der Druck- und Spaltzugversuche erfolgte durch die Vorgabe einer gleichmäßigen Kolbengeschwindigkeit des Prüfzylinders.

Der Beton-Elastizitäts-Modul für den Bereich tiefer Temperaturen wurde aus den Spannungs-Dehnungs-Linien ermittelt, wobei der E-Modul als Sekantenmodul zwischen dem Ursprung und dem Meßpunkt für  $1/3$  der Betondruckfestigkeit definiert wurde.

Das Temperaturdehnverhalten wurde in einem Quarzglasdilatometer gemessen; dabei tasteten ein geschlossener Quarzrahmen die Betonproben von unten und ein Quarzstab die Probe von oben an. Zwischen Quarzrahmen und -stab konnte außerhalb der Kältekammer bei Raumtemperatur die thermische Dehnung der Probe gemessen werden.

### 3.3 Ergebnisse der Betonversuche

Die Ergebnisse der Versuche zur Bestimmung der Tieftemperatureigenschaften der untersuchten Betone sind in den Bildern 1 bis 15 und den Tabellen 2 bis 5 dargestellt. Tabelle 2 enthält die Druckfestigkeiten bei Raumtemperatur (+ 20 °C) der beiden untersuchten Betone in Abhängigkeit von der Lagerungsart und der Prüfkörpergeometrie. Die hier angegebenen Lagerungsarten entsprechen den bereits in Abs. 3.1 beschriebenen Bedingungen, wobei noch zusätzlich die entsprechend DIN 1048 vorgeschriebenen Lagerungsbedingungen, hier als Normlagerung bezeichnet, aufgenommen wurde. Erwartungsgemäß beeinflussen unterschiedliche Probekörpergeometrien die ermittelten Betonfestigkeiten; bekannte Verhältniszahlen erlauben aber einen di-

Tabelle 2: Betondruckfestigkeiten in Abhängigkeit von Lagerungsbedingungen und Probekörpergeometrie ( $\vartheta = + 20 \text{ °C}$ ,  $t \approx 150 \text{ Tage}$ )

Beton	<div style="display: inline-block; transform: rotate(-45deg);">                     Probe- körper Lagerungsart                 </div>	Würfel 15/15/15 cm $\beta_w$	Zylinder $\varnothing 15, h = 30 \text{ cm}$ $\beta_c$	Zylinder $\varnothing 8, h = 16 \text{ cm}$ $\beta_c$
		N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>
1:5,4:0,6	in Folie unter Wasser Normlagerung	56	42,0 46,0 $\beta_c = 0,85 \cdot \beta_w =$ 47,6	43,4 42,4
1:6,4:0,8	20/65 in Folie unter Wasser Normlagerung	36	22,0 29,0 30,0 $\beta_c = 0,85 \cdot \beta_w =$ 30,6	20,4 25,8 25,9

rekten Vergleich der ermittelten Festigkeiten. Die Lagerungsbedingungen bewirken bei RT nur geringe Unterschiede in der Betondruckfestigkeit. Bei Normallagerung (20 °C und 65 % rel. Feuchte) allerdings fällt die ermittelte Festigkeit gegenüber der bei den anderen Lagerungsarten ermittelten deutlich ab. Dies wird durch den aus der Lagerungsbedingung bewirkten Wasserentzug der Probe hervorgerufen, wodurch der Hydratationsprozeß nicht im vergleichbaren Umfang abläuft.

Tabelle 3: Elastizitätsmodule der Betone in Abhängigkeit von Lagerungsbedingungen und Probekörpergeometrie ( $\vartheta = + 20 \text{ °C}$ ,  $t \approx 150 \text{ Tage}$ )

Beton	Lagerung	$E_b \text{ [N/mm}^2\text{]}$	
		aus $\sigma$ - $\varepsilon$ -Diagramm Zylinder: $\varnothing 8, h = 16 \text{ cm}$	aus Normprüfung $\varnothing 15, h = 30 \text{ cm}$
1:5,4:0,6	in Folie u. Wasser	28 240	26 670
		27 300	27 630
1:6,4:0,8	20/65	16 170	18 000
	in Folie	23 580	23 300
	u. Wasser	26 330	23 800

Für den Elastizitätsmodul bei Raumtemperatur gilt nahezu Entsprechendes. Wie Tabelle 3 zeigt, wird das RT-Prüfergebnis durch unterschiedliche Größe der Prüfzylinder nicht beeinflusst, Lagerungen unter Wasser oder in Folie führen fast zu identischen Beton-Elastizitäts-Modulen, bei Normallagerung dagegen fällt der ermittelte E-Modul deutlich geringer aus. Dies ist, wie schon bei den RT-Festigkeiten beschrieben, auf den Hydratationsgrad und die daraus bewirkte Steifigkeit der Proben zurückzuführen.

Das thermische Dehnverhalten der beiden untersuchten Betone nach unterschiedlichen Lagerungsbedingungen ist für den Temperaturbereich von  $+ 20 \text{ °C}$  bis  $- 170 \text{ °C}$  in den Bildern 1 und 9

dargestellt. Bei beiden Betonen wird das thermische Dehnverhalten im Tieftemperaturbereich durch die Lagerungsart in gleicher Art und Weise beeinflusst. Während infolge Wasserlagerung im Temperaturbereich  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  eine starke Expansion stattfindet, verschwindet diese bei foliengelagerten Proben fast gänzlich. Die foliengelagerten Proben zeigen, ähnlich den bei 20/65 gelagerten Proben, ein nahezu lineares thermisches Dehnverhalten.

Für Normallagerung (20/65) und für versiegelte Lagerung treten nur geringe Unterschiede im thermischen Dehnverhalten auf, auch die Veränderung der Betonzusammensetzung und damit die Veränderung des Wasser/Zement-Faktors bewirkt für diese Lagerungsarten keine nennenswerten Änderungen des thermischen Dehnverhaltens. Nur bei Lagerung unter Wasser fällt die Expansion im Bereich  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  bis  $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$  bei einem W/Z-Faktor von 0,8 wesentlich größer aus als bei einem W/Z-Faktor von 0,6. Hierfür ist die höhere Porosität eines Betons mit hohem W/Z-Faktor und damit das größere Wasseraufnahmevermögen dieses Betons verantwortlich. Ein Anhaltswert hierfür ergibt die Feuchte  $u_m$  der untersuchten Probekörper, siehe Tabelle 4 und 5.

Das thermische Dehnverhalten von Beton wird wesentlich von seiner Porosität und von seinem Wassergehalt beeinflusst. Wie aus den Bildern 1 und 9 ersichtlich, beeinflusst vorwiegend die Wasseraufnahme infolge von Lagerungsbedingungen das thermische Dehnverhalten, dagegen ist der Einfluß durch Erhöhung des W/Z-Faktors gering.

Tabelle 4: Ergebnisse der Druck- und Spaltzugversuche an PZ-Beton  
1 : 6,4 : 0,8 (B 25) - Mittelwerte

Lagerungs- art	$u_m$	$\vartheta$	$E_b$	$\beta_c$	$-\epsilon_{bu}$	$\beta_{SZ}$
	M.-%	°C	kN/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	‰	N/mm <sup>2</sup>
20/65	2,89	+ 20	16,2	20,4	2,8	2,7
		- 80	24,6	31,2	3,1	4,0
		- 135	20,2	48,0	3,2	5,3
		- 170	26,1	41,8	2,1	5,0
in Folie	6,37	+ 20	23,6	25,8	2,5	3,6
		- 80	33,3	69,2	4,1	8,6
		- 135	40,7	103,6	3,2	9,3
		- 170	42,5	97,9	2,5	9,3
unter Wasser	9,04	+ 20	26,3	25,9	2,4	2,9
		- 80	41,1	102,6	4,4	8,6
		- 135	47,2	132,9	2,7	8,4
		- 170	59,4	124,6	2,2	9,3

Tabelle 5: Ergebnisse der Druck- und Spaltzugversuche an PZ-Beton  
1 : 5,4 : 0,6 (B 45) - Mittelwerte

Lagerungs- art	$u_m$	$\vartheta$	$E_b$	$\beta_c$	$-\epsilon_b$	$\beta_{SZ}$
	M.-%	°C	kN/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	‰	N/mm <sup>2</sup>
in Folie	5,51	+ 20	28,2	43,4	2,6	4,9
		- 80	36,1	98,4	4,1	11,6
		- 135	49,7	131,0	3,0	12,4
		- 170	50,0	138,4	3,0	10,5
unter Wasser	7,42	+ 20	27,3	42,4	2,9	4,4
		- 80	45,0	103,4	3,6	10,2
		- 135	61,8	126,7	2,5	9,8
		- 170	65,8	108,0	2,6	10,7



Der Einfluß der Prüftemperatur,  $+ 20\text{ °C} \leq \vartheta \leq - 170\text{ °C}$ , und der Einfluß der Lagerungsart auf die Festigkeitskennzahlen der beiden untersuchten Betone ist in den Tabellen 4 und 5 und in den Bildern 2 bis 8 und 10 bis 15 dargestellt. In diesen Darstellungen sind die Mittelwerte aus zumindest 3 Versuchen angegeben. Für die Veränderung der Betondruckfestigkeit, der Betonbruchdehnung, des Elastizitätsmoduls und der Spaltzugfestigkeit infolge tiefer Temperaturen werden sowohl die absoluten Meßergebnisse als auch die prozentuale Verfestigung dargestellt. Die Darstellung der Spannungs-Dehnungs-Linien für den Bereich tiefer Temperaturen erfolgt getrennt nach Lagerungsbedingung und Betonart.

Erwartungsgemäß steigen die Festigkeitswerte - Zylinderdruckfestigkeit, Spaltzugfestigkeit, Elastizitätsmodul - mit fallender Temperatur an. Dabei fällt die Steigerung um so größer aus, je höher der Feuchtigkeitsgehalt der Probekörper ist. Auch das Verformungsvermögen des Betons wird im wesentlichen vom Feuchtigkeitsgehalt der Probekörper beeinflusst. Mit zunehmender Feuchtigkeit und abnehmender Temperatur ändern sich die Betonverformungen ausgeprägt zum linear-elastischen und spröden Verhalten. Allerdings weisen die Betonbruchdehnungen unabhängig vom Feuchtigkeitsgehalt der Probekörper hier bei  $- 80\text{ °C}$  ein ausgeprägtes Maximum auf. Mit weiter abnehmenden Temperaturen nehmen die Betonbruchdehnungen stetig ab und liegen bei  $- 170\text{ °C}$  nahe bei den Ausgangswerten bei RT.

Die Zylinderdruckfestigkeiten steigen beim PZ-Beton mit  $W/Z = 0,8$  bis  $\vartheta = - 135\text{ °C}$  in etwa proportional mit fallender Temperatur an, bei weiterer Absenkung der Temperatur bis  $- 170\text{ °C}$  nehmen sie nur unbedeutend ab. Die maximale Druckfestigkeitssteigerung liegt bei Normallagerung bei ca. 230 %, bei Folienlagerung bei ca. 400 % und bei Wasserlagerung bei ca. 500 %. Entsprechendes gilt auch für PZ-Betone mit  $W/Z = 0,6$ , wobei die Festigkeitssteigerung prozentual allerdings geringer ausfällt und bei Folienlagerung sowie bei Wasserlagerung maximal ca. 300 % beträgt, siehe hierzu Bilder 2 und 10.

Der Druck-Elastizitäts-Modul der untersuchten Betone nimmt mit abnehmender Temperatur annähernd linear zu. Für den PZ-Beton mit  $W/Z = 0,8$  beträgt die Zunahme bei  $-170\text{ °C}$  für Normallagerung ca. 160 %, für Folienlagerung 180 % und für Wasserlagerung ca. 230 %. Entsprechendes gilt für den PZ-Beton mit  $W/Z = 0,6$ . Die Steigerung des Elastizitätsmoduls beträgt bei  $-170\text{ °C}$  ebenfalls ca. 180 % für Folienlagerung und ca. 240 % für Wasserlagerung, siehe Bilder 4 und 12.

Die Betonbruchdehnungen (Dehnungen unter Höchstlast) unterscheiden sich bei  $-170\text{ °C}$  und bei Raumtemperatur kaum. Dies gilt sowohl für die beiden untersuchten Betone als auch für die drei vorgegebenen Lagerungsverhältnisse.

Die Betonbruchdehnung bei  $+20\text{ °C}$  und bei  $-170\text{ °C}$  lag immer bei ca.  $-2,5\text{ ‰}$ . Unabhängig von der Lagerungsart und der Betonart zeigte die Betonbruchdehnung hier bei  $-80\text{ °C}$  ein ausgeprägtes Maximum. Die Dehnungszunahme bis  $-80\text{ °C}$  und die Dehnungsabnahme unterhalb  $-80\text{ °C}$  verläuft annähernd linear. Bei  $-80\text{ °C}$  beträgt die Bruchdehnungszunahme für PZ-Beton mit  $W/Z = 0,8$  ca. 110 % für Normallagerung, ca. 165 % für Folienlagerung und 180 % für Wasserlagerung. Bei PZ-Betonen mit  $W/Z = 0,6$  beträgt diese Zunahme für Folienlagerung ca. 160 % und für Wasserlagerung ca. 125 %, siehe Bilder 3 und 11.

Die oben angeführten Ergebnisse zum Einfluß tiefer Temperaturen auf die Betondruckfestigkeit, den Betondruckelastizitätsmodul und die Betonbruchdehnung sind auch aus den Spannungs-Dehnungs-Linien erkennbar, vgl. Bilder 5 bis 7, 13 und 14. Die Form der Spannungs-Dehnungs-Linien wird durch die Temperatur deutlich beeinflusst. Ab Temperaturen unterhalb  $-135\text{ °C}$  ist das Spannungs-Dehnungs-Verhalten nahezu linear-elastisch und spröde. Dieses linear-elastische und spröde Verhalten ist um so ausgeprägter, je höher der Feuchtigkeitsgehalt der einzelnen Probe ist. Dabei übertrifft der Einfluß der Lagerung bei weitem den des  $W/Z$ -Faktors.

Die Spaltzugfestigkeit des Betons wird infolge tiefer Temperaturen in etwa gleichem Maße wie die Druckfestigkeit gesteigert. Die Festigkeitssteigerung fällt allerdings tendentiell etwas geringer aus als die der Druckfestigkeit, der Maximalwert wird auch hier etwa bei  $-135\text{ }^{\circ}\text{C}$  erreicht. Nach Erreichen des Maximalwertes und weiterer Temperaturabsenkung fällt die Spaltzugfestigkeit geringfügig ab. Die maximalen Steigerungsraten der Spaltzugfestigkeit betragen bei PZ-Beton mit  $W/Z = 0,8$  bei Normallagerung ca. 200 %, bei Folienlagerung ca. 260 % und bei Wasserlagerung ca. 320 %. Entsprechendes gilt für PZ-Beton mit  $W/Z = 0,6$ , hier betragen die Steigerungsraten ca. 250 % bei Folienlagerung und 240 % bei Wasserlagerung, siehe Bilder 8 und 15.

### 3.4 Beschreibungsmöglichkeit der mechanischen Kennwerte von Beton für den Bereich tiefer Temperaturen

Die Druckverfestigung von Beton für den Bereich tiefer Temperaturen ist schon von mehreren Forschern angenähert worden, siehe z. B. [4 bis 6]. Aufgrund der Versuchsergebnisse, vgl. Abs. 3.3, die eine sehr eindeutige Abhängigkeit der mechanischen Kennwerte von Beton für den Bereich tiefer Temperaturen vom Feuchtegehalt der untersuchten Probekörper angeben, wird hier entsprechend [4] eine Beschreibungsmöglichkeit gewählt, die neben der Prüftemperatur auch die Feuchte berücksichtigt.

Das Alter der Proben bei Versuchsbeginn betrug ca. 1/2 Jahr und entspricht damit baupraktischen Verhältnissen. Aufgrund der Lagerungszeit konnte sich in den Probekörpern die Ausgleichsfeuchte  $u_m$  einstellen. Damit kann das Betonalter als Parameter ausgeschlossen werden. Die Feuchte wird im Versuch nach folgender Beziehung errechnet:

$$u_m = \frac{G(t) - G_{tr}}{G_{tr}} 100 \quad [\text{M.-%}] \quad (1)$$

Hierin ist:  $G(t)$ : Gewicht der Probe nach der Lagerung  
 $G_{tr}$ : Gewicht der Probe nach 105 °C Trocknung

Wie die Betonfeuchte überschläglich anhand des Mischungsverhältnisses berechnet werden kann, wird in [4] angegeben.

Aufgrund der Versuchsergebnisse läßt sich die mittlere Zylinderdruckfestigkeit für den Bereich tiefer Temperaturen aus 2 Summanden zusammensetzen und wie folgt formulieren:

$$\beta_{c\vartheta} = \beta_{co} + \beta_{c\vartheta} \quad (2)$$

Demnach ergibt sich die Tieftemperaturfestigkeit aus der Festigkeit bei RT plus einem temperaturabhängigen Zuwachs.

$$\beta_{c\vartheta} = \beta_{co} + 12 u_m \left[ 1 - \left( \frac{\Delta\vartheta + 190}{190} \right)^2 \right] \quad (3)$$

Hierin ist:

$\beta_{co}$ : Betondruckfestigkeit bei RT

$\vartheta$ : Temperatur in °C

$$- 170 \text{ °C} \leq \vartheta \leq + 20 \text{ °C}$$

$$\Delta\vartheta = \vartheta - 20 \text{ °C} \quad (4)$$

$u_m$  nach Gleichung (1) in %

Die Auswertung der Gleichung (2) für die beiden untersuchten Betone bei Berücksichtigung der unterschiedlichen Lagerungsbedingungen und den damit verbundenen unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalten ist in den Bildern 16 und 17 dargestellt. Dabei sind  $\beta_{co}$  und  $u_m$  den Tabellen 4 und 5 entnommen.

Um einen Vergleich mit den Versuchsergebnissen zu ermöglichen, sind die Mittelwerte der Versuchsergebnisse in diese Bilder mit aufgenommen worden. Die Übereinstimmung für Versuchsergebnisse und Berechnung ist für den Beton B 25 zufriedenstellend. Beim Beton B 45 wird durch das Berechnungsergebnis die Betondruckfestigkeit für Folienlagerung bei tiefen Temperaturen unterschätzt.

Die Tieftemperaturabhängigkeit der Druckdehnung des Betons unter der Zylinderdruckfestigkeit kann ebenfalls in der Form wie Gleichung (2) approximiert werden:

$$\varepsilon_{c\vartheta} = \varepsilon_{co} + \Delta\varepsilon_{c\vartheta} \quad (5)$$

Auch hier ergibt sich die Bruchdehnung bei tiefen Temperaturen aus der bei RT plus einem temperaturabhängigen Anteil. Da, wie die Versuche ausweisen, die Betonbruchdehnung bei - 80 °C ein Maximum aufweist, kann eine mathematische Formulierung nur durch die Aufsplittung in 2 gültige Temperaturbereiche gelingen, nämlich:

$$20 \text{ }^{\circ}\text{C} \geq \vartheta \geq - 80 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\varepsilon_{c\vartheta} = \varepsilon_{co} - \left[ 1 - \left( \frac{\Delta\vartheta + 100}{100} \right)^2 \right] \frac{u_m}{5} \quad (6)$$

$$- 80 \text{ }^{\circ}\text{C} \geq \vartheta \geq - 170 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$\varepsilon_{c\vartheta} = \varepsilon_{co} - \frac{\vartheta + 170}{90} \cdot \frac{u_m}{5} \quad (7)$$

hierin ist

$\varepsilon_{co}$ : Betonbruchdehnung bei RT

$\Delta\vartheta$  nach Gleichung (4)

$u_m$  nach Gleichung (1) in %

Die Auswertung der Gleichungen (6) und (7) für die beiden untersuchten Betone bei Berücksichtigung der unterschiedlichen Lagerungsbedingungen und den damit verbundenen unter-

schiedlichen Feuchtigkeitsgehalten ist in den Bildern 18 und 19 dargestellt.  $\epsilon_{co}$  und  $u_m$  sind dabei den Tabellen 4 und 5 entnommen. Um einen Vergleich mit den Versuchsergebnissen zu ermöglichen, sind die Mittelwerte der Versuchsergebnisse in diese Bilder mit aufgenommen worden. Beim Beton B 45 werden durch die Gleichungen (6) und (7) bei Wasserlagerung die Betonbruchdehnungen im Bereich tiefer Temperaturen etwas überschätzt. Für die anderen Parameter ist die Übereinstimmung zwischen Approximation und Versuchsergebnis zufriedenstellend.

Wie in Abs. 3.3 beschrieben, wird auch der Elastizitätsmodul des Betons im Bereich tiefer Temperaturen wesentlich vom Feuchtigkeitsgehalt beeinflusst. Eine mathematische Formulierung der Tieftemperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls konnte daher in gleicher Weise wie die Zylinderdruckfestigkeit und die Bruchdehnung erfolgen:

$$E_{b\theta} = E_{bo} + \Delta E_{b\theta} \quad (8)$$

Der Beton-Druckelastizitäts-Modul bei tiefen Temperaturen ergibt sich aus dem bei RT plus einem temperaturabhängigen Anteil.

$$E_{b\theta} = E_{bo} + 4 u_m \left[ 1 - \frac{\Delta\theta + 190}{190} \right] \quad (9)$$

Hierin ist:

$$\begin{aligned} E_{bo} &= \text{Beton-Druckelastizitäts-Modul bei RT} \\ \Delta\theta &\text{ nach Gleichung (4)} \\ u_m &\text{ nach Gleichung (1) in \%} \end{aligned}$$

Die Auswertung der Gleichung (9) für die beiden untersuchten Betone bei Berücksichtigung der unterschiedlichen Lagerungsbedingungen und den damit verbundenen unterschiedlichen Feuchtigkeitsgehalten ist in den Bildern 20 und 21 dargestellt. Die Eingangswerte  $E_{bo}$  und  $u_m$  sind dabei den Tabellen 4 und 5 entnommen.

Um einen Vergleich mit den Versuchsergebnissen zu erleichtern, sind auch die Mittelwerte der Versuchsergebnisse in diesen Bildern dargestellt. Die Anpassung an die Versuchsergebnisse erscheint befriedigend, auch wenn tendentiell beim PZ-Beton mit  $W/Z = 0,8$  eine geringe Überschätzung des Elastizitätsmoduls und beim PZ-Beton mit  $W/Z = 0,6$  eine geringe Unterschätzung erkennbar ist.

Die Spannungs-Dehnungs-Linien für Beton für mittigen Druck können bei RT als parabolisch verlaufend beschrieben werden. Wie in Abs. 3.3 dargestellt, verändert sich dieses Verhalten bei tiefen Temperaturen zunehmend zu einem geradlinien Verlauf. Der parabolische Verlauf läßt sich durch eine quadratische Gleichung nachbilden, wobei der Exponent mit  $n = 2$  bei RT das Parabel-Rechteck-Diagramm nach DIN 1045 beschreibt. Durch die Änderung des Exponenten von  $n = 2$  nach  $n = 1$  gelingt die Transformation zum linear-elastischen Verhalten, das bei extrem tiefen Temperaturen beobachtet wird.

$$n = 1 + \frac{\vartheta + 170}{170} \quad (10)$$

$$1 \leq n \leq 2$$

$$\frac{\sigma}{\beta_{c\vartheta}} = 1 - \left(1 - \frac{\varepsilon}{\varepsilon_{c\vartheta}}\right)^n \quad (11)$$

Die Auswertung der Gleichung (11) ist getrennt nach Lagerungsbedingung und Betongüte in den Bildern 22 bis 26 dargestellt. Die rechnerische Ermittlung der  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Diagramme erfolgte auf der Grundlage der Versuchsergebnisse  $\beta_c(\vartheta)$  und  $\varepsilon_{bu}(\vartheta)$  nach den Tabellen 4 und 5. Auf die Ermittlung der  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Linien aus rechnerisch ermittelten Werten  $\beta_{c\vartheta}$  und  $\varepsilon_{c\vartheta}$  nach Gleichung (3), (6) und (7) wurde hier verzichtet, da mit diesen Darstellungen gezeigt werden soll, daß mit den Gleichungen (10) und (11) die temperaturabhängige Völligkeit der  $\sigma$ - $\varepsilon$ -Linien zutreffend beschrieben werden kann. Für foliengelagerte und unter Wasser gelagerte Versuchskörper zeigen die Bilder 23 bis 26 unabhängig

von der Betongüte nur sehr geringfügige Unterschiede zwischen Versuch und Rechnung. Nur bei Normallagerung (20/65) wird bei tiefen Temperaturen die Völligkeit der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien unterschätzt, vgl. Bild 22. Werden zur analytischen Ermittlung der  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien auch analytisch ermittelte Festigkeiten und Bruchdehnungen zu Grunde gelegt, so entspricht der Fehler der dann erstellten  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien dem Fehler, der bereits mit der Ermittlung der mechanischen Kennwerte vorliegt, siehe Bilder 16 bis 19.

Für den Normaltemperaturbereich läßt sich die zentrische Zugfestigkeit nach CEB-FIP-Model Code direkt mit der Betondruckfestigkeit verknüpfen. Da die Ermittlung der zentrischen Zugfestigkeit im Tieftemperaturbereich noch nicht gelungen ist, muß für diesen Temperaturbereich der Umweg über die Spaltzugfestigkeit gemacht werden. Anhand der Versuchsergebnisse, die ausweisen, daß die Abhängigkeiten im Bereich tiefer Temperaturen für die Zylinderdruckfestigkeit wie für die Spaltzugfestigkeit tendentiell gleich sind, kann eine direkte Verknüpfung dieser beiden tieftemperaturabhängigen Festigkeiten gelingen. Damit ergibt sich im Mittel folgende Formulierung:

$$\beta_{SZ\theta} \approx 0,43 \beta_{c\theta}^{2/3} \quad (12)$$

In den Bildern 27 und 28 ist die Verknüpfung der mittleren Zylinderdruckfestigkeit mit der Spaltzugfestigkeit für beide untersuchten Betone bei Berücksichtigung der unterschiedlichen Lagerungsbedingungen im Tieftemperaturbereich dargestellt. Gleichung (12) beschreibt unabhängig von der Betongüte und dem Feuchtigkeitsgehalt des Betons für den ganzen Temperaturbereich  $+ 20 \text{ }^{\circ}\text{C} \leq \theta \leq - 170 \text{ }^{\circ}\text{C}$  zutreffend den mittleren Zusammenhang zwischen  $\beta_{c\theta}$  und  $\beta_{SZ\theta}$ . Die in den Bildern 27 und 28 angegebenen oberen und unteren Grenzkurven umschließen alle bisher ermittelten Versuchsergebnisse. Dabei stellt sich folgende Tendenz heraus, daß die untere Grenzkurve  $\beta_{SZ\theta} = 0,3 \beta_{c\theta}^{2/3}$  maßgebend wird, wenn die Proben bei  $+ 20 \text{ }^{\circ}\text{C}$  geprüft werden oder wenn die Prüfung im Tieftemperaturbereich an normalgelagerten (20/65) Proben erfolgt. Die obere Grenzkurve  $\beta_{SZ\theta} = 0,56 \beta_{c\theta}^{2/3}$  begrenzt die Ergebnisse für versiegelte und wassergesättigte Proben im Tieftemperaturbereich.



#### 4. MATERIALKENNWERTE VON BEWEHRUNGSSTAHL BEI TIEFEN TEMPERATUREN

##### 4.1 Baustoffe und Probekörper

Für die Untersuchungen wurde ein handelsüblicher Betonstahl BSt 420/500 RU mit einem Nenndurchmesser von 16 mm herangezogen. Die geometrische Ausbildung der Stäbe und die mechanischen Eigenschaften der Stähle entsprachen den Anforderungen der DIN 488. Für die Verwendung eines handelsüblichen Massensstahles sprachen zwei Gründe. Zum einen können bei Verwendung üblicher Betonstähle Tieftemperatur-Versuchsergebnisse zum Verbundverhalten und zur Rißentwicklung in Stahlbetonbauteilen direkt mit bereits bekannten Versuchen bei RT verglichen werden, zum anderen sollten die Versuche Tendenzen aufzeigen, wie weit normaler Betonstahl tieftemperaturgeeignet ist.

Bei den weiteren Untersuchungen wurden insgesamt drei Sorten BSt 420/500 RU verwendet. Die typischen Eigenschaften dieser Sorten sind in Tabelle 6 aufgelistet. An der Stahlsorte A wurden stichpunktartig die Tieftemperatureigenschaften bestimmt. Die Probekörper wiesen eine Länge von 900 mm auf und hatten einen Nenndurchmesser von 16 mm. Die Probekörper waren nicht bearbeitet, sie behielten ihre naturgemäße Oberflächenprofilierung.

Tabelle 6: Eigenschaften der verwendeten Betonstähle BSt 420/500 RU bei RT

Stahl-sorte	Nenn-Ø [mm]	Ist-Ø [mm]	$R_{p0,2}$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$R_m$ [N/mm <sup>2</sup> ]	$A_{10}$ [%]	$f_R$
A	16,0	15,85	492	692	17,5	0,072
B	16,0	16,07	575	790	16,4	0,058
C	16,0	16,17	438	635	22,13	0,067

#### 4.2 Versuchsdurchführung

Das Temperaturdehnverhalten am Stahl wurde mit dem gleichen Meßverfahren wie für den Beton gemessen. Dazu wurden 160 mm lange unbearbeitete Betonstäbe mit Durchmesser 16 mm in einem Quarzglasdilatometer in einer Kältekammer kontinuierlich abgekühlt. Die Abkühlgeschwindigkeit betrug maximal 2 °C/min. Das Quarzglasdilatometer erlaubte es, die thermische Dehnung der Betonstahlprobe außerhalb der Kältekammer bei RT mit Hilfe eines induktiven Wegaufnehmers zu messen, vgl. Abs. 3.2.

Die Messung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften erfolgte in einer speziell für Untersuchungen an Spann- und Bewehrungsstählen entwickelten Kältekammer, die in einer Universalprüfmaschine eingebaut war, vgl. [7]. Die Proben wurden darin über Keile und Hülsen verankert. Die freie Prüflänge betrug ca. 700 mm. Die Temperaturabsenkung erfolgte durch dosierte Zufuhr von Flüssigstickstoff, der mit Hilfe eines Propellers im Kühlraum zerstäubt wurde. Durch eine Dreiteilung der Kühlkammer in den Bereich der Prüflänge und den der Verankerungen konnte durch die unabhängige Temperaturregelung jedes der drei Bereiche eine gleichmäßige Temperaturabsenkung und Temperaturkonstanthaltung während der Versuchsdurchführung gewährleistet werden. Die Abkühlgeschwindigkeit betrug maximal 4 °C/min, der Zugversuch wurde erst durchgeführt, wenn die vorgesehene Prüftemperatur über die gesamte Probekörperlänge erreicht war.

Die Aufzeichnung des  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramms erfolgte vollautomatisch mittels induktiver Wegaufnehmer, elektronischer Meßverstärker und eines x-y-Schreibers. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug i. M. 20 kN/min. Damit die Meßsysteme zur Aufnahme des  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramms beim Bruch der Probe nicht zerstört wurden, wurden diese Versuche in der Regel nach deutlichem Überfahren der Streckgrenze abgebrochen. Bei Bestimmung der Zugfestigkeit wurden die Proben nicht instrumentiert, es wurde dafür ein Maschinendiagramm aufgenommen.

#### 4.3 Ergebnisse der Stahlversuche

Die Ergebnisse der Versuche zur Bestimmung der Tieftemperatureigenschaften des untersuchten Betonstahles BSt 420/500 RU,  $\emptyset$  16 mm, sind in den Bildern 29 bis 31 und in der Tabelle 7 dargestellt. Tabelle 7 enthält die Festigkeiten, den Elastizitätsmodul und die Gleichmaßdehnung bei Raumtemperatur und bei zwei ausgewählten Tieftemperaturen (- 100 °C, - 170 °C). In Bild 29 ist das thermische Dehnverhalten, in Bild 30 sind die ermittelten  $\sigma$ - $\epsilon$ -Diagramme, und in Bild 31 ist die Einordnung der ermittelten Versuchsergebnisse in bereits bekannt nach [3] dargestellt.

Tabelle 7: Ergebnisse der Zugversuche an Bewehrungsstahl BSt 420/500 RU,  $\emptyset$  16 mm (Mittelwerte)

$\vartheta$	$E_s$	$R_{p0,01}$	$R_{p0,2}$	$R_{p1,0}$	$R_m$	$A_g$
°C	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%
+ 20	205 730	412	484	531	710	10,5
- 100	212 070	539	586	595	766	6,7
- 165	229 870	724	801	811	950	6,2

Das in Bild 29 aufgezeigte Temperaturdehnverhalten der drei Betonstahlsorten BSt 420/500 RU weist eine einheitliche Verkürzung der Proben von 1,82 % bei einer Temperaturerniedrigung von Raumtemperatur auf - 170 °C aus. Wie bisher vorliegende Untersuchungen im Rahmen von Materialprüfungen zeigten, sind Kurvenverlauf und Temperaturdehnwert von Stahlart bzw. -herstellungsverfahren nahezu unabhängig.

Wie aus Tabelle 7 und den Bildern 30 und 31 hervorgeht, steigt bei einer Abkühlung des Betonstahles BSt 420/500 RU,  $\emptyset$  16 mm, von + 20 °C auf - 170 °C die Streckgrenze um 65 %, die Zugfestigkeit aber nur um 34 % an. Diese Festigkeitszunahme ist mit

einer Abnahme der Zähigkeit verbunden: Bruchdehnungen und Gleichmaßdehnungen nehmen deutlich ab. Die Proben brachen jedoch nicht spröde, sondern zeigten die typischen Anzeichen eines zähen Bruches (plastische Verformungen). Der Elastizitätsmodul nimmt mit abnehmender Temperatur geringfügig zu, wobei sich der linear-elastische Bereich zu höheren Spannungen verschiebt. Der Bruch der Proben erfolgte immer auf der freien Prüflänge.

Ein Vergleich der hier ermittelten Prüfergebnisse mit der in [3] zusammenfassenden Darstellung unterschiedlicher Werkstoffuntersuchungen an naturharten und wärmebehandelten Betonrippenstählen zeigt, daß hier ein typisches Prüfergebnis für einen handelsüblichen Betonstahl vorliegt, vgl. Bild 31.

Ob der hier geprüfte Bewehrungsstahl bis zu Temperaturen von  $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$  uneingeschränkt tieftemperaturgeeignet ist, kann anhand der Versuchsergebnisse nicht beschrieben werden. Zum einen weisen die Proben auch bei Temperaturen von  $-170\text{ }^{\circ}\text{C}$  noch plastische Verformungsanteile auf, zum anderen nehmen aber die Bruchdehnungen im Bereich tiefer Temperaturen deutlich ab, und auch das progressive Annähern der tieftemperaturabhängigen Streckgrenze und Zugfestigkeit deuten eine zunehmende Versprödung an. Hier wären noch weitere Untersuchungen erforderlich.

#### 4.4 Beschreibungsmöglichkeit der mechanischen Kennwerte von Bewehrungsstahl für den Bereich tiefer Temperaturen

Wie schon oben beschrieben, liegt zum mechanischen Verhalten der Betonstähle für den Bereich tiefer Temperaturen eine Vielzahl von Forschungsarbeiten vor, siehe z. B. [3]. Dennoch befindet sich die Materialforschung auch für diesen Werkstoff bei diesen Bedingungen im Anfangsstadium, so daß die Kriterien zur Eignung, Prüfung und Überwachung von Bewehrungsstahl für den Tieftemperatureinsatz noch nicht festgelegt wurden. Viel-

leicht liegt in dieser Unsicherheit der Grund, daß - obwohl die bekannten Versuchsergebnisse einheitliche Tendenzen aufzeigen - ein mathematischer Ansatz zur Beschreibung der Tieftemperatureigenschaften noch nicht vorliegt.

Wie Bild 29 zeigt, weisen die hier untersuchten Bewehrungsstäbe eine einheitliche und stetige Abnahme des Temperaturausdehnungskoeffizienten mit fallender Temperatur auf. Entsprechend den Versuchsergebnissen läßt sich die Temperaturdehnzahl für den Temperaturbereich von 0 °C bis - 170 °C wie folgt formulieren:

$$\alpha_s = \left( \frac{\vartheta [\text{K}]}{3,181 \cdot 10^{-6}} \right)^{1/7,59} [10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}] \quad (13)$$

In Bild 32 sind die Auswertung der Gleichung (13) sowie die ermittelten Versuchsergebnisse dargestellt. Mittlere Versuchsergebnisse und Berechnung zeigen eine gute Übereinstimmung.

Aus den  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien für den Tieftemperaturbereich, vgl. Bild 30, kann entnommen werden, daß der für RT übliche bilineare Ansatz auch für tiefe Temperaturen übernommen werden kann. Die Zunahme des Elastizitätsmoduls erfolgt in etwa temperaturlinear und beträgt bei - 170 °C etwa 10 %. Demnach kann die Temperaturabhängigkeit des Elastizitätsmoduls wie folgt formuliert werden:

$$E_{s\vartheta} = E_{s0} + \frac{E_{s0}}{10} \left( 1 - \frac{\Delta\vartheta + 190}{190} \right) \quad (14)$$

Hierin sind:

$E_{s0}$ : Elastizitätsmodul bei RT  
 $\Delta\vartheta$  nach Gleichung (4) in °C

Die Auswertung der Gleichung (14) mit den mittleren Versuchsergebnissen ist in Bild 33 dargestellt.

Die Zunahme der Streckgrenze  $\beta_S$  eines Bewehrungsstahles BSt 420/500 RU infolge tiefer Temperaturen kann ähnlich wie die Zunahme der Betonfestigkeit beschrieben werden durch die Streckgrenze bei RT und einen temperaturabhängigen Anteil:

$$\beta_{S\vartheta} = \beta_{S0} + \Delta\beta_{S\vartheta} \quad (15)$$

$$\beta_{S\vartheta} = \beta_{S0} + \Delta\beta_S \left(1 - \sqrt{\frac{\Delta\vartheta + 190}{190}}\right) \quad (16)$$

Hierin sind:

$\beta_{S0}$ : Streckgrenze bei RT  
 $\Delta\vartheta$  nach Gleichung (4) in °C

Entsprechend [4] soll der absolute Zuwachs  $\Delta\beta_S$  mit nicht mehr als 300 bis 500 N/mm<sup>2</sup> berücksichtigt werden. Im Gegensatz zu den Formulierungen in [4] wird hier über den temperaturabhängigen Zuwachs nicht mehr linear, sondern quadratisch verfügt. Damit wird der progressiveren Zunahme der Streckgrenze gegenüber der Zugfestigkeit im Bereich sehr tiefer Temperaturen Rechnung getragen, vgl. Bild 31. Die Auswertung der Gleichung (16) mit der Gegenüberstellung der mittleren Versuchsergebnisse erfolgt in Bild 34. Für einen absoluten Zuwachs von  $\Delta\beta_S = 300$  N/mm<sup>2</sup> liegt hier eine gute Übereinstimmung von Rechnung und Versuchsergebnissen vor.

Für die späteren Versuche an Stahlbetonbauteilen, die zum überwiegenden Teil weggesteuert gefahren werden sollen, ist die Information, wann der Bewehrungsstahl den linear elastischen Verformungsbereich verläßt, von wesentlicher Bedeutung. Wenn die 0,01 %-Dehngrenze entsprechend der Gleichung (16) formuliert wird, ergibt sich die Proportionalitätsgrenze zu:

$$\varepsilon_{Sp}(\vartheta) = \frac{R_{p0,01\vartheta}}{E_{S\vartheta}} \quad (17)$$

Mittlere Versuchsergebnisse sowie der Verlauf der Gleichung (17) sind in Bild 35 dargestellt. Es zeigt sich eine gelungene mathematische Beschreibung der Versuchsergebnisse.

## 5. ZUSAMMENFASSUNG

Der 2. Teil des Berichtes zum Forschungsvorhaben "Ingenieurmäßiges Berechnungsmodell für Stahl- und Spannbeton bei sehr tiefen Temperaturen" befaßt sich mit den Tieftemperatureigenschaften der Baustoffe, die für die bevorstehenden Bauteilversuche verwendet werden.

Um das Verhalten von Stahl- bzw. Spannbetonbauteilen bei tiefen Temperaturen durch experimentell begründete, theoretische Modellvorstellungen beschreiben zu können, ist es zur Schaffung einer Ausgangsbasis erforderlich, das Materialverhalten der Einzelbaustoffe für den Bereich tiefer Temperaturen zu formulieren. Daher wurde das Werkstoffverhalten von Beton und Stahl in Druck- und Zugversuchen bei verschiedenen Tieftemperaturen geprüft. Die ermittelten temperaturabhängigen Materialkennwerte wie Festigkeiten,  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien, thermisches Dehnverhalten sind mit bekannten Versuchsergebnissen vergleichbar, so sind die des Betons nicht nur abhängig von der Prüftemperatur, sie werden auch wesentlich vom momentanen Feuchtigkeitsgehalt der Betonprobekörper beeinflusst. Tendentiell verhalten sich aber alle untersuchten Betone ähnlich. Mit abnehmenden Temperaturen erfolgt eine zunehmende Verfestigung und Versteifung, bei - 170 °C verhält sich der Beton linear-elastisch und spröde. Der untersuchte Betonstahl erfährt auch bei tiefen Temperaturen eine zunehmende Verfestigung, wobei diese bei der Streckgrenze wesentlich deutlicher als bei der Zugfestigkeit erfolgt. Die Steifigkeit wird nur geringfügig beeinflusst. Plastisches Verformungsvermögen wurde zwar auch in Zugversuchen bei - 170 °C festgestellt, ob dieses aber hinlänglich nachweist, daß Spröbruchverhalten bei tiefen Temperaturen auszuschließen ist, kann anhand dieser Versuche nicht beurteilt werden.

Die Veränderung der wesentlichen Materialkennwerte von Beton und Bewehrungsstahl infolge tiefer Temperaturen wurde durch mathematische Formulierungen beschrieben. Somit wird es er-

möglichst, anhand der Ergebnisse von Normprüfungen bei Normaltemperatur das Materialverhalten auch im Tieftemperaturbereich treffend zu beschreiben.

Soweit nicht deutlich darauf hingewiesen wird, ist bei allen weiterhin durchgeführten Bauteilversuchen die hier angegebene Werkstoffauswahl nicht geändert worden. Dies gilt sowohl für die Betonzusammensetzung und die Lagerungsart der Betonkörper und damit für den momentanen Feuchtigkeitsgehalt als auch für die Güte, Zusammensetzung und Geometrie des Betonstahles.



## 6. LITERATUR

- [1] Cryogenic behaviour of materials for prestressed concrete, FIP-State of art report, May 1982.
- [2] Wiedemann, G.: Zum Einfluß tiefer Temperaturen auf Festigkeit und Verformung von Beton, Dissertation Technische Universität Braunschweig, 1982.
- [3] Rostásy, F.S., Scheuermann, J., Wiedemann, G.: Verhalten von Spann- und Bewehrungsstahl bei tiefen Temperaturen. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 2/82 und 3/82.
- [4] Rostásy, F.S.: Verfestigung und Versprödung von Beton durch tiefe Temperaturen, Fortschritte im konstruktiven Ingenieurbau, G. Rehm zum 60. Geburtstag, W. Ernst & Sohn, 1984.
- [5] Schäper, M.: Tieftemperaturbeanspruchte Spannbetonbehälter - Sicherheitsbehälter für verflüssigte Gase, Dissertation Universität Essen, 1984.
- [6] Goto, Y., Miura, T.: Mechanical properties of reinforced concrete members at very low temperatures, Concrete Library of JSCE Vol. 1, July 1983.
- [7] Erdmann, J., Landwehrs, K., Neisecke, J., Rostásy, F.S.: Tieftemperatur - Prüftechnologien für Bewehrungs- und Spannstähle sowie Beton im Temperaturbereich + 20 °C bis - 180 °C, Betonwerk + Fertigteil-Technik, 1/83 und 2/83.

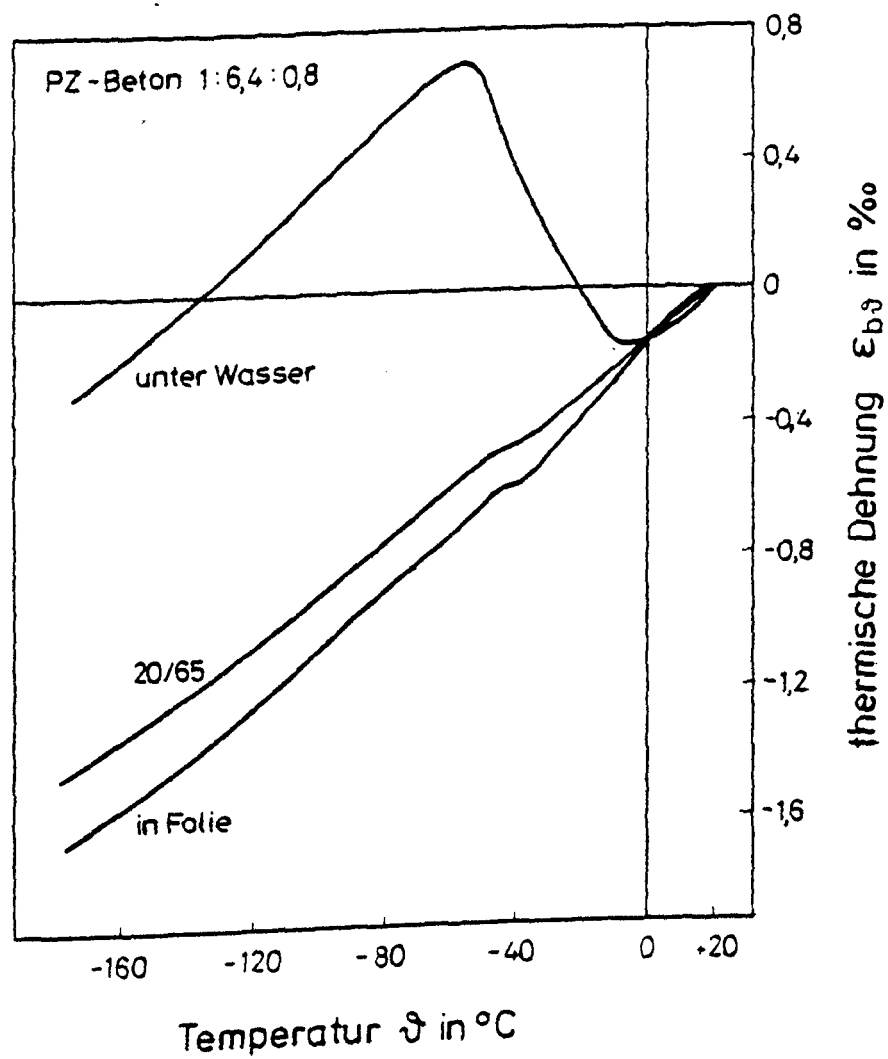


Bild 1: Thermische Dehnung des Betons (B 25)  
nach unterschiedlichen Lagerungsbedingungen

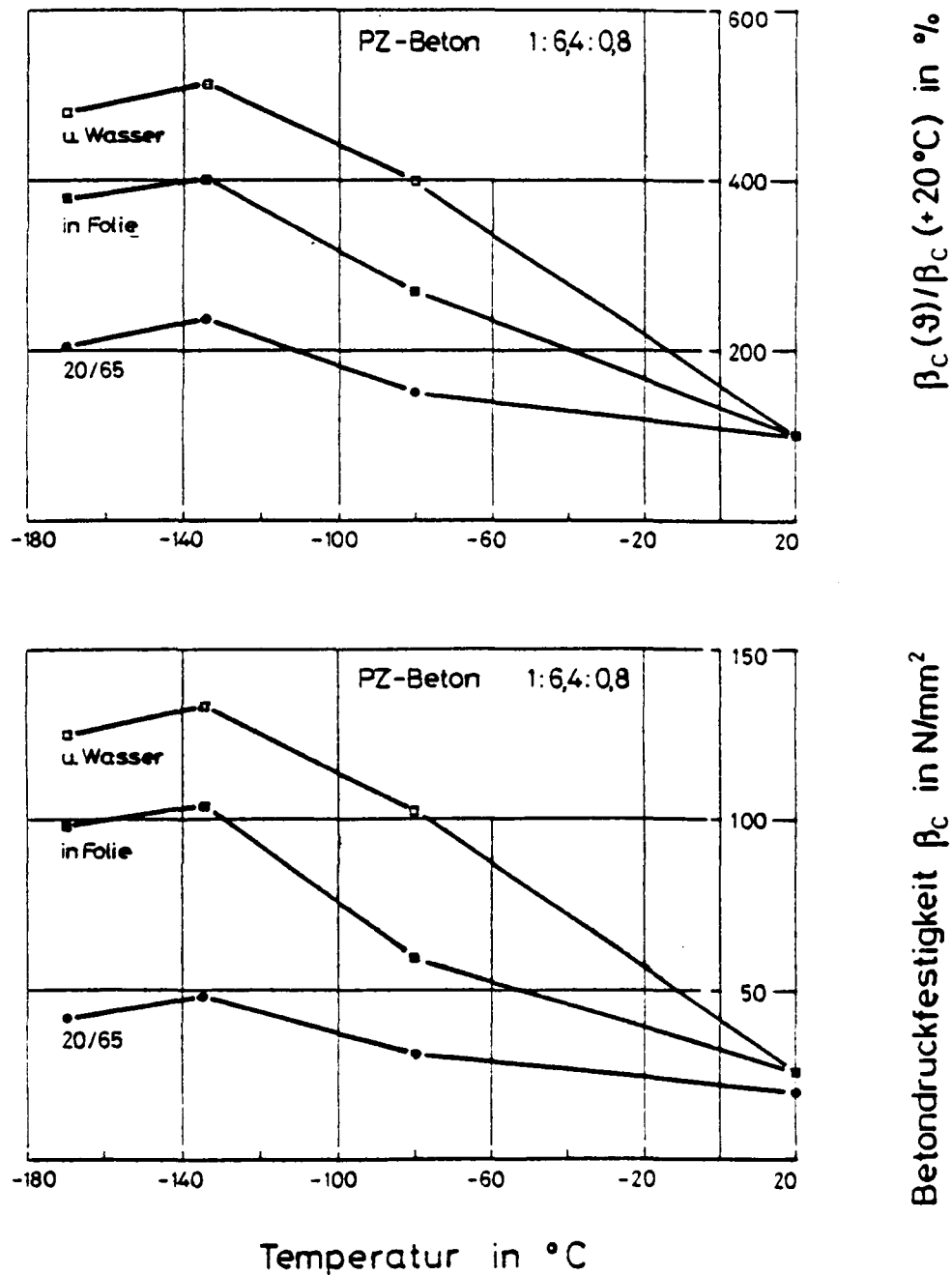


Bild 2: Zylinderdruckfestigkeit des Betons (B 25) im Tieftemperaturbereich nach unterschiedlichen Lagerungsbedingungen

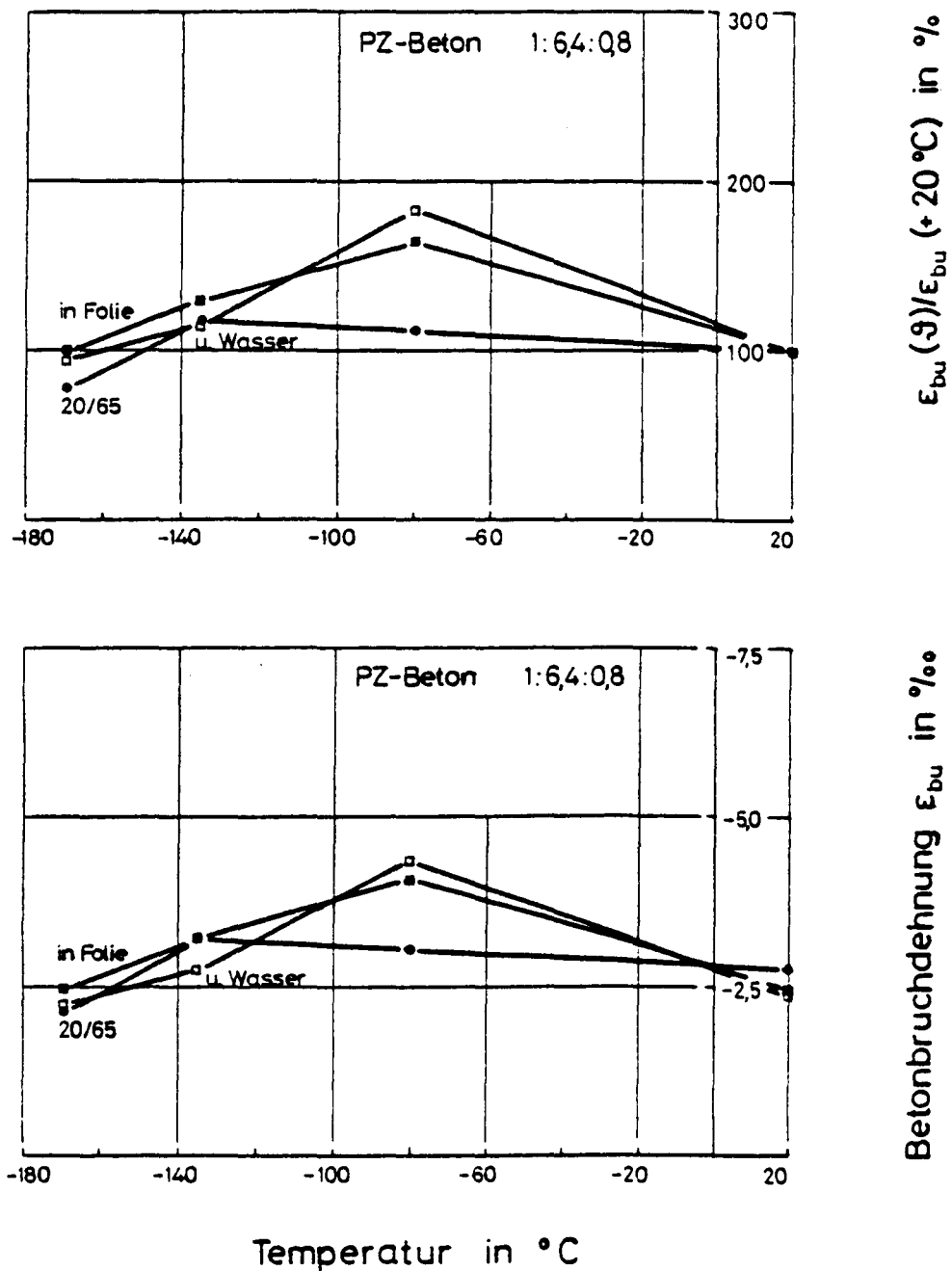
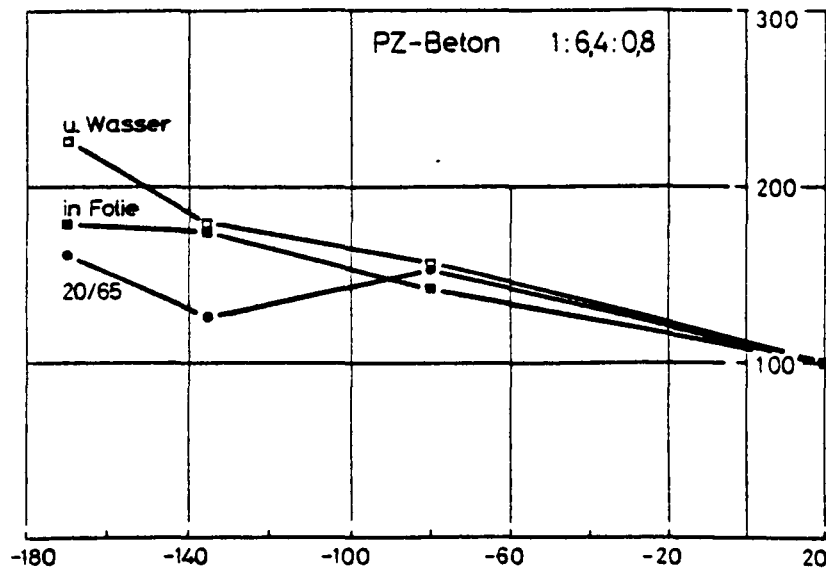
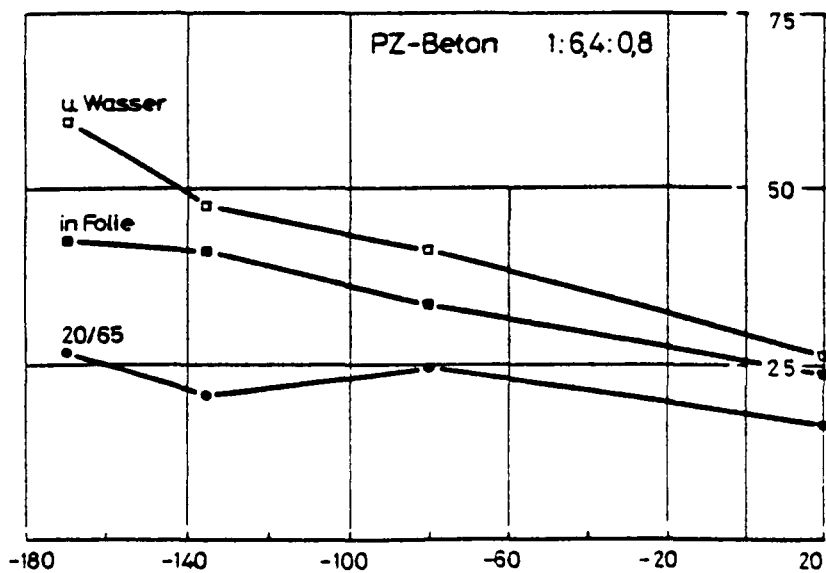


Bild 3: Bruchdehnungen des Betons (B 25) im Tieftemperaturbereich nach unterschiedlichen Lagerungsbedingungen



$E_d(\theta)/E_b(+20^\circ\text{C})$  in %



Elastizitätsmodul  $E_b$  in  $10^3 \text{ N/mm}^2$

Temperatur in °C

Bild 4: Elastizitätsmodul des Betons (B 25) im Tieftemperaturbereich nach unterschiedlichen Lagerungsbedingungen

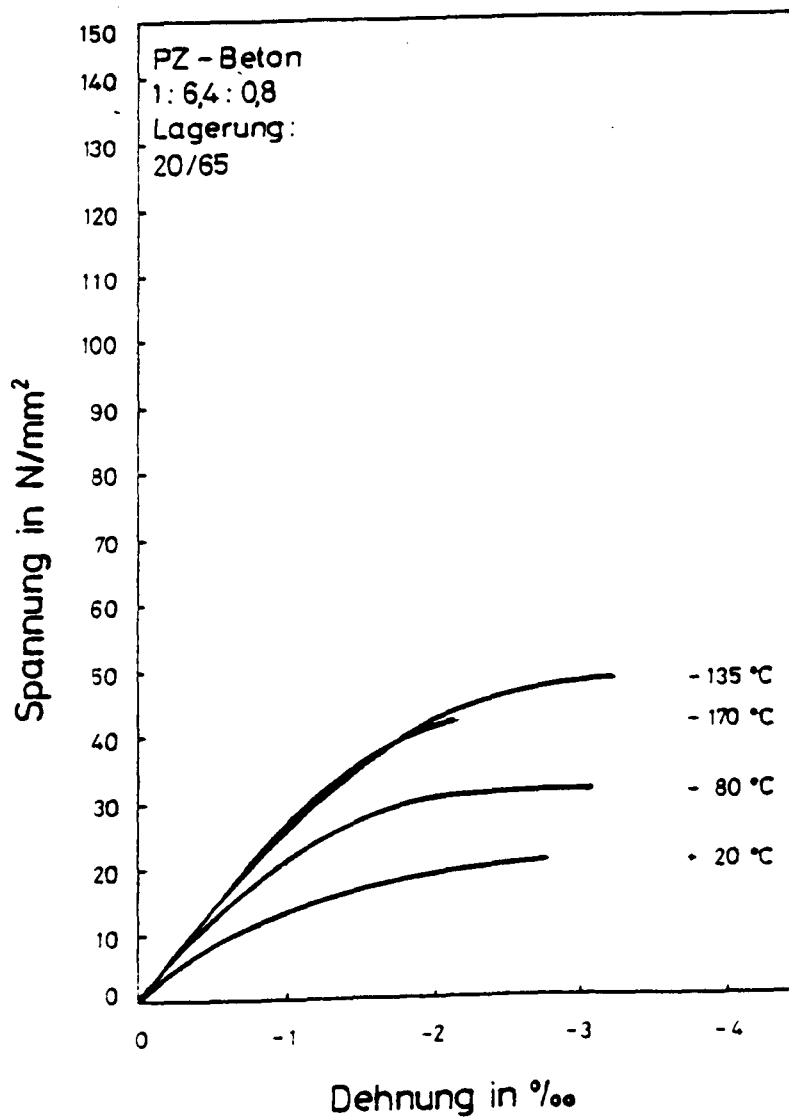


Bild 5: Spannungs-Dehnungs-Linien des Betons (B 25) im Tieftemperaturbereich nach Normallagerung

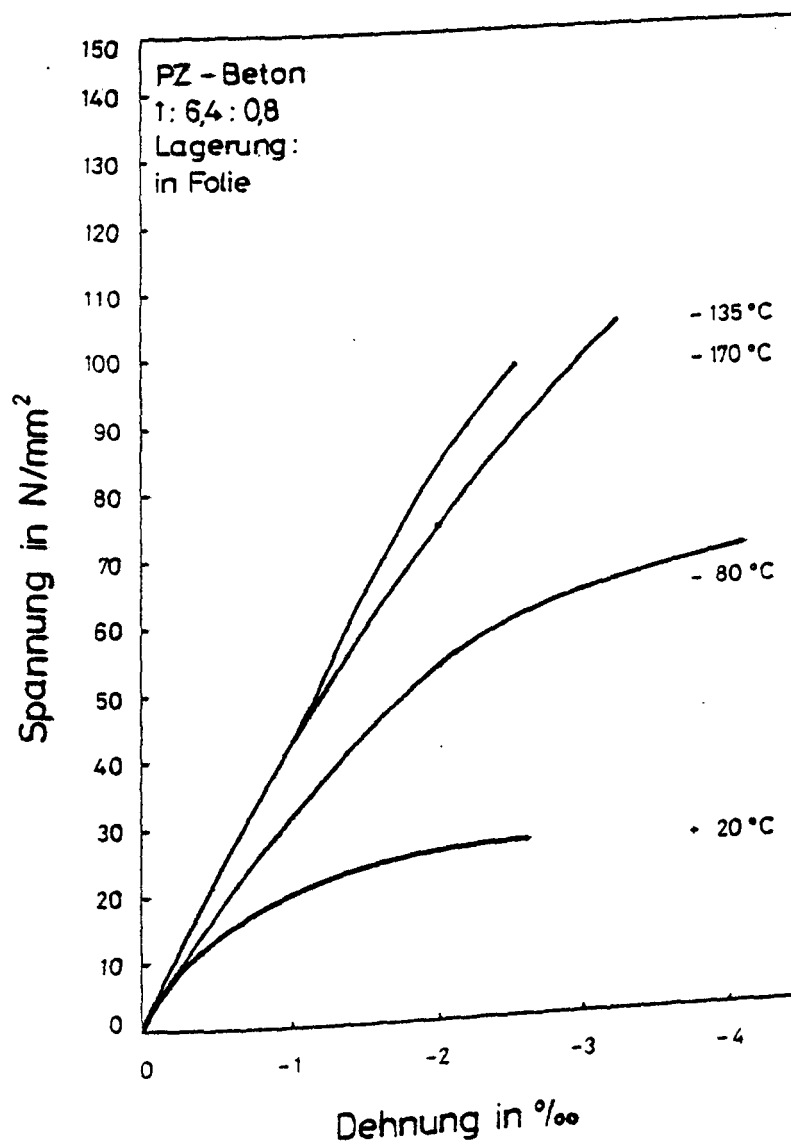


Bild 6: Spannungs-Dehnungs-Linien des Betons (B 25)  
im Tieftemperaturbereich nach versiegelter  
Lagerung

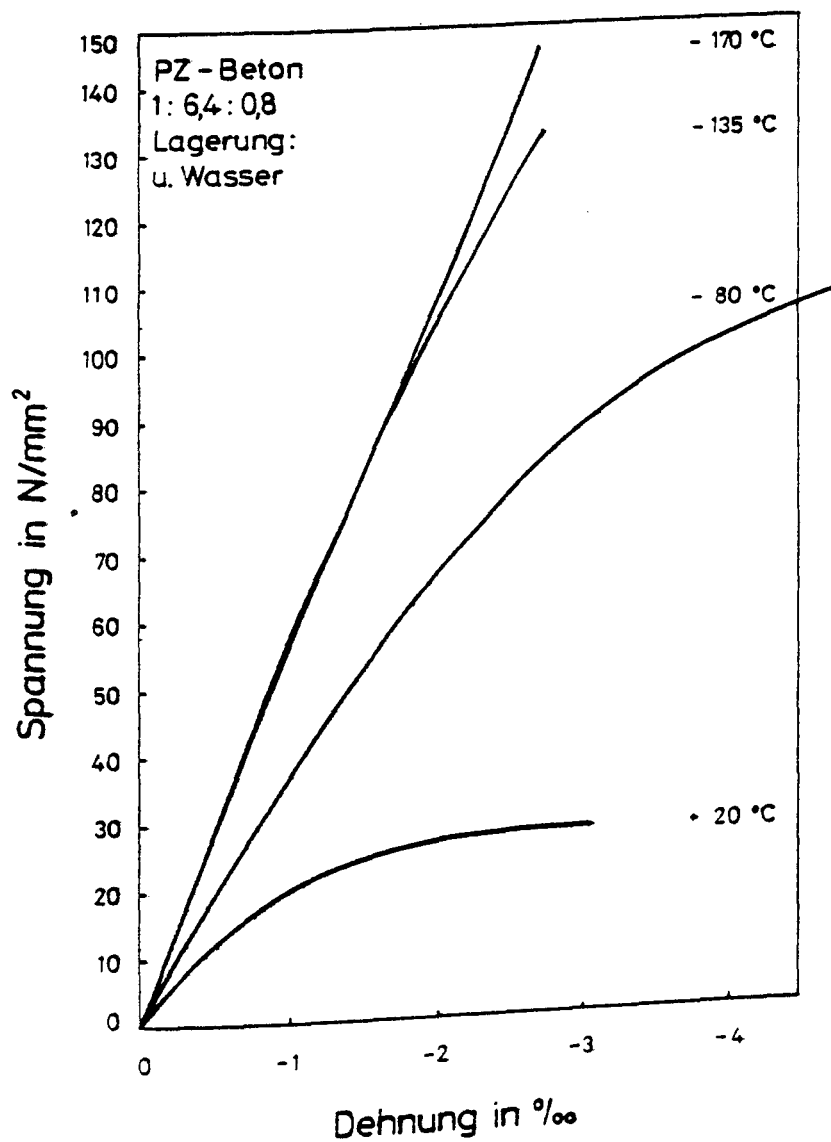


Bild 7: Spannungs-Dehnungs-Linien des Betons (B 25)  
 im Tieftemperaturbereich nach Wasserlagerung



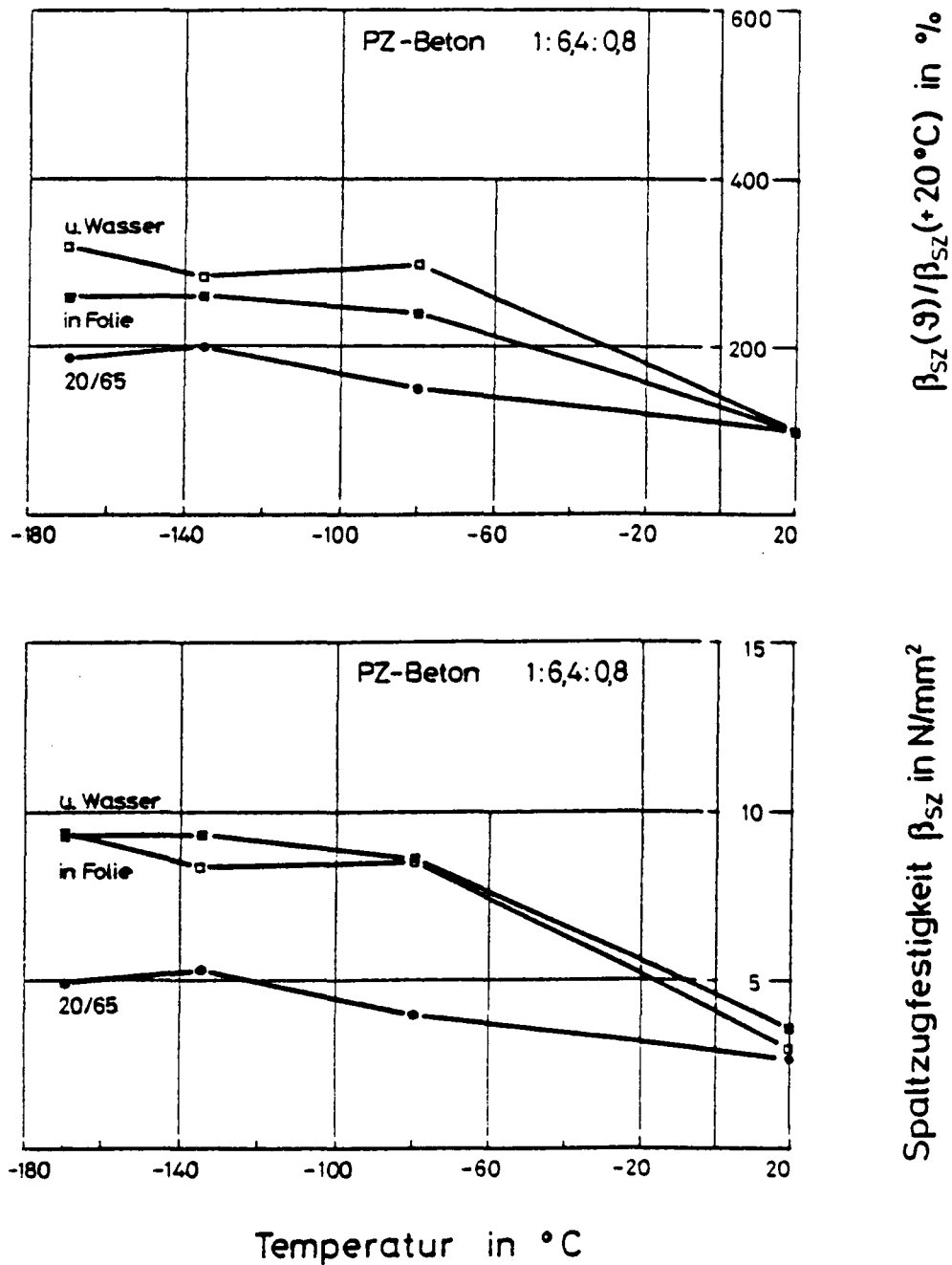


Bild 8: Spaltzugfestigkeit des Betons (B 25) im Tieftemperaturbereich nach unterschiedlichen Lagerungsbedingungen

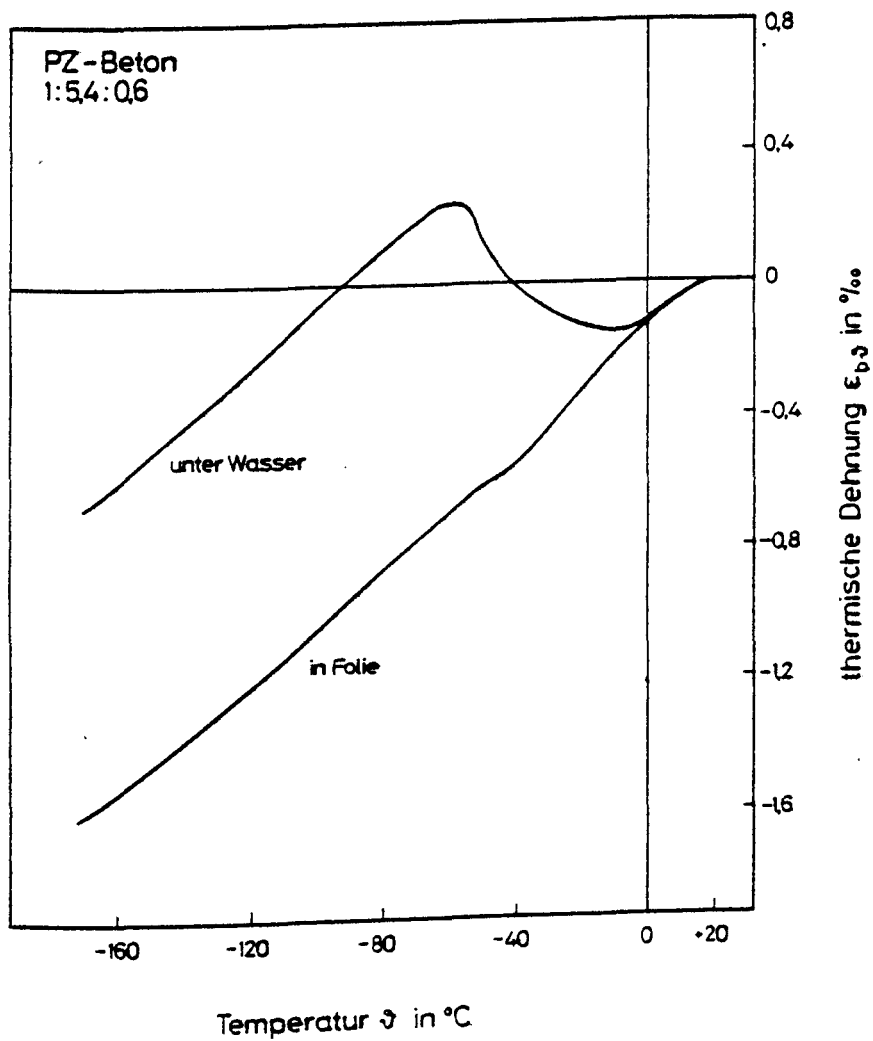
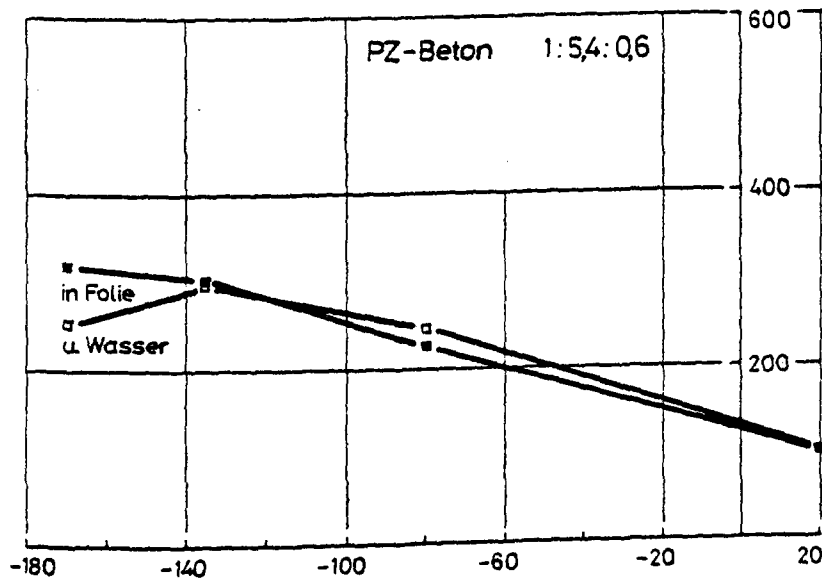
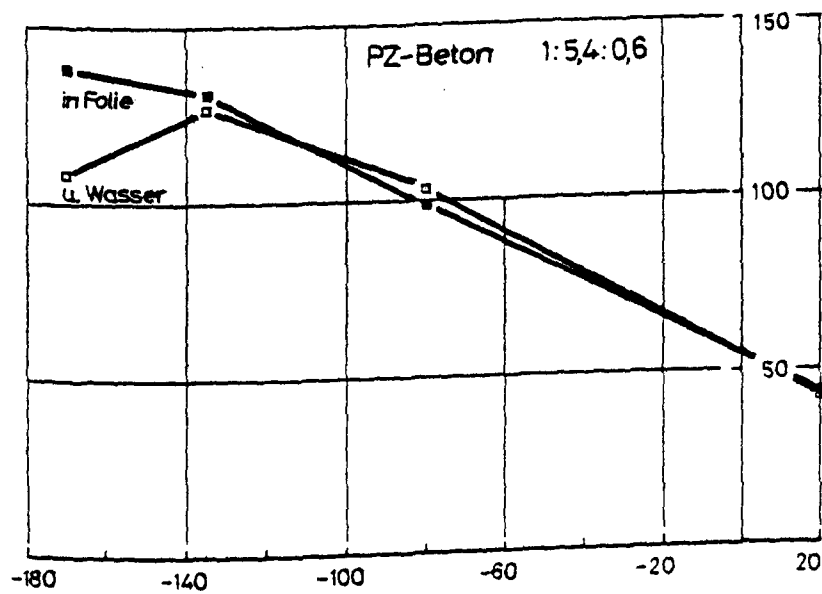


Bild 9: Thermische Dehnung des Betons (B 45) nach unterschiedlichen Lagerungsbedingungen



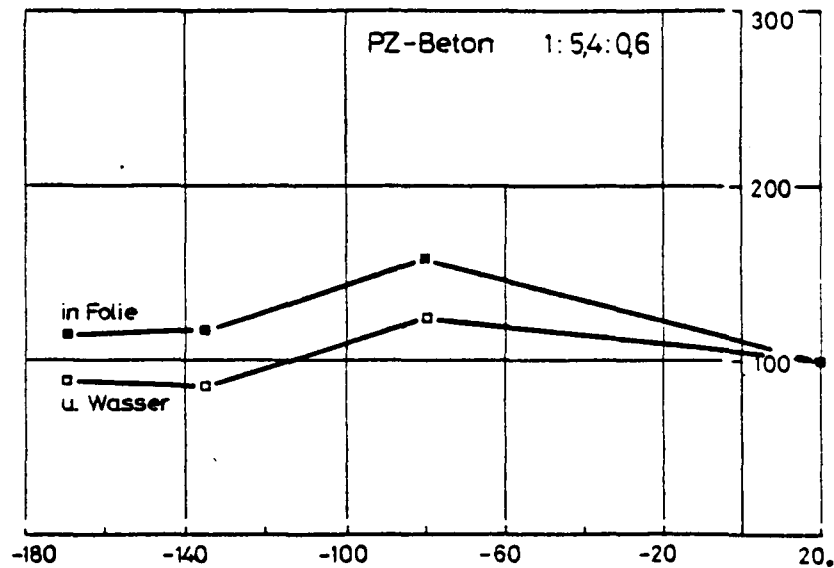
$\beta_c(\theta)/\beta_c(+20^\circ\text{C})$  in %



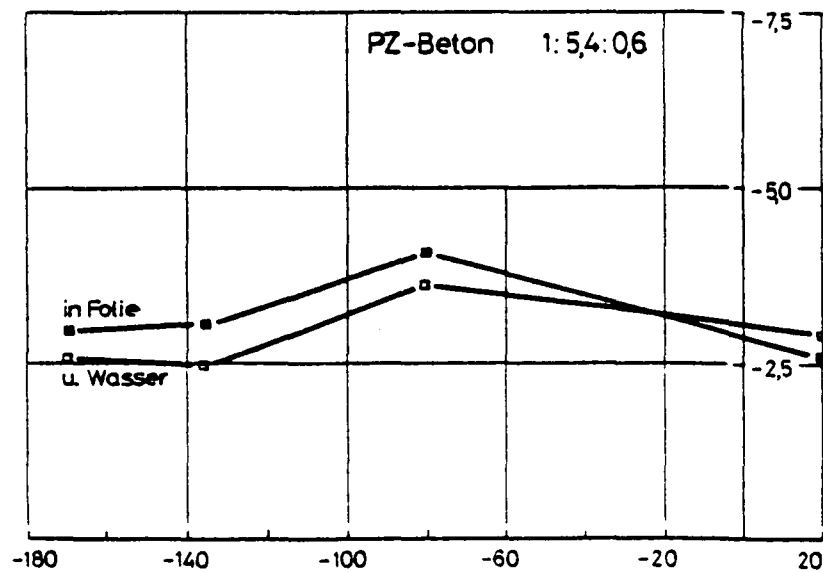
Betondruckfestigkeit  $\beta_c$  in N/mm²

Temperatur in °C

Bild 10: Zylinderdruckfestigkeit des Betons (B 45) im Tieftemperaturbereich nach unterschiedlichen Lagerungsbedingungen



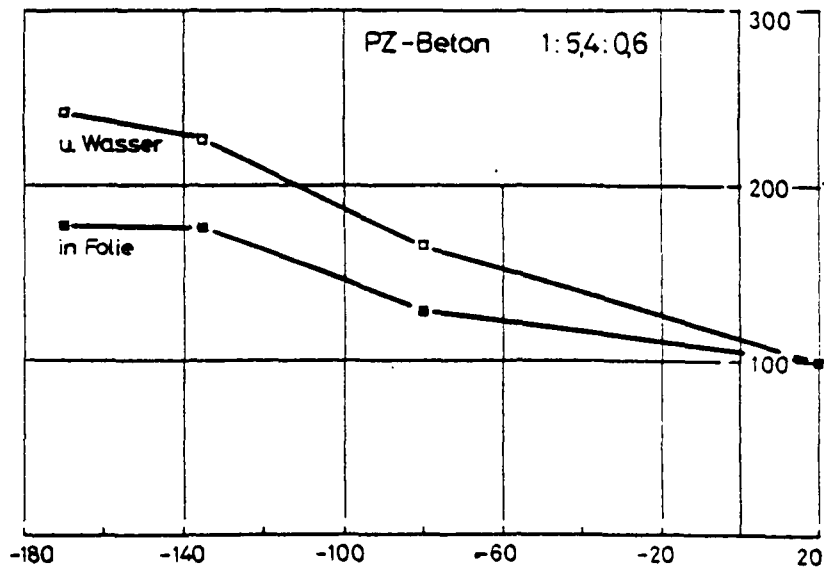
$\epsilon_{bu}(\theta)/\epsilon_{bu}(+20^{\circ}\text{C})$  in %



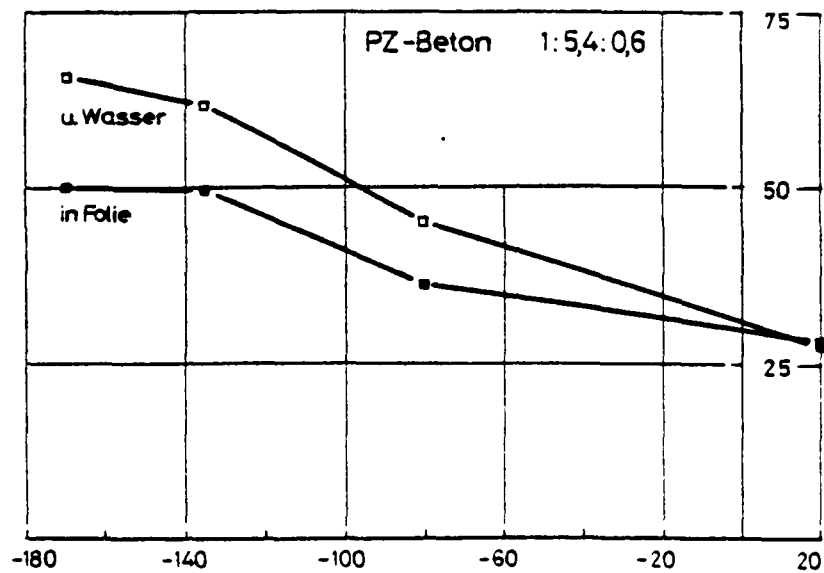
Betonbruchdehnung  $\epsilon_{bu}$  in ‰

Temperatur in °C

Bild 11: Bruchdehnungen des Betons (B 45) im Tieftemperaturbereich nach unterschiedlichen Lagerungsbedingungen



$E_b(T)/E_b(+20^\circ\text{C})$  in %



Elastizitätsmodul  $E_b$  in  $10^3 \text{ N/mm}^2$

Temperatur in °C

Bild 12: Elastizitätsmodul des Betons (B 45) im Tieftemperaturbereich nach unterschiedlichen Lagerungsbedingungen

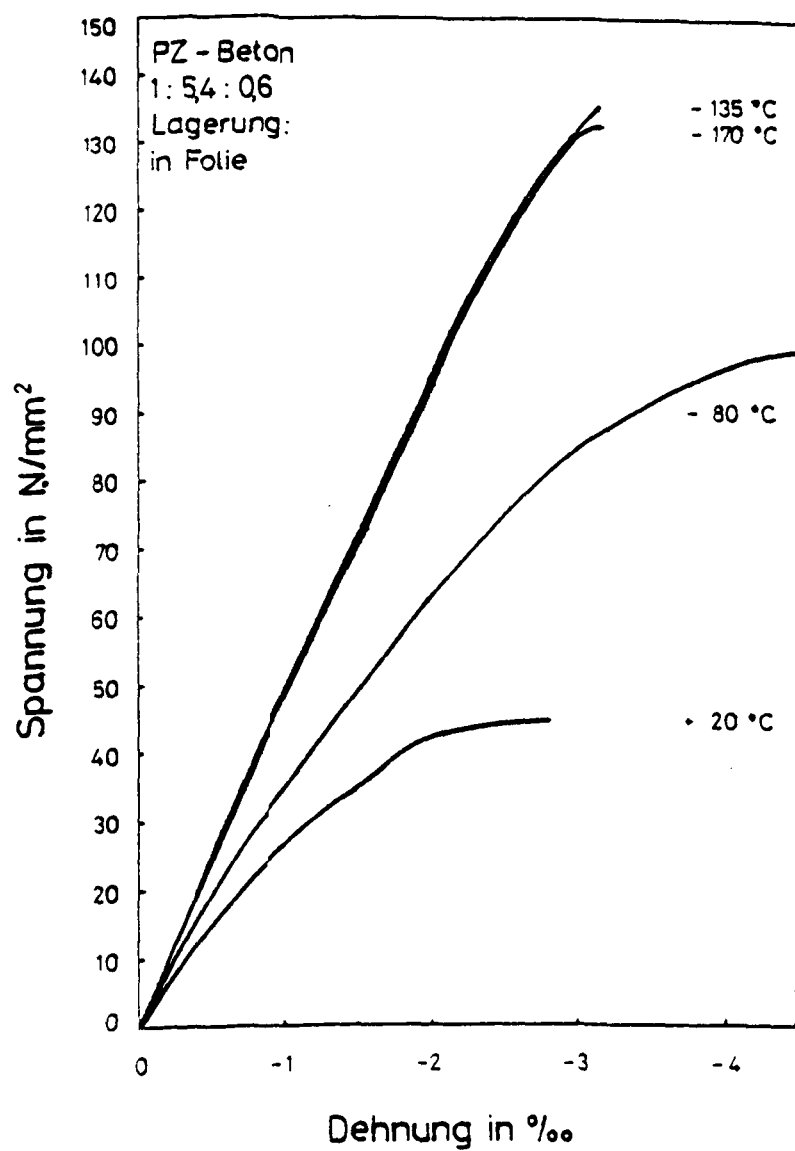


Bild 13: Spannungs-Dehnungs-Linien des Betons (B 45) im  
 Tieftemperaturbereich nach versiegelter Lagerung

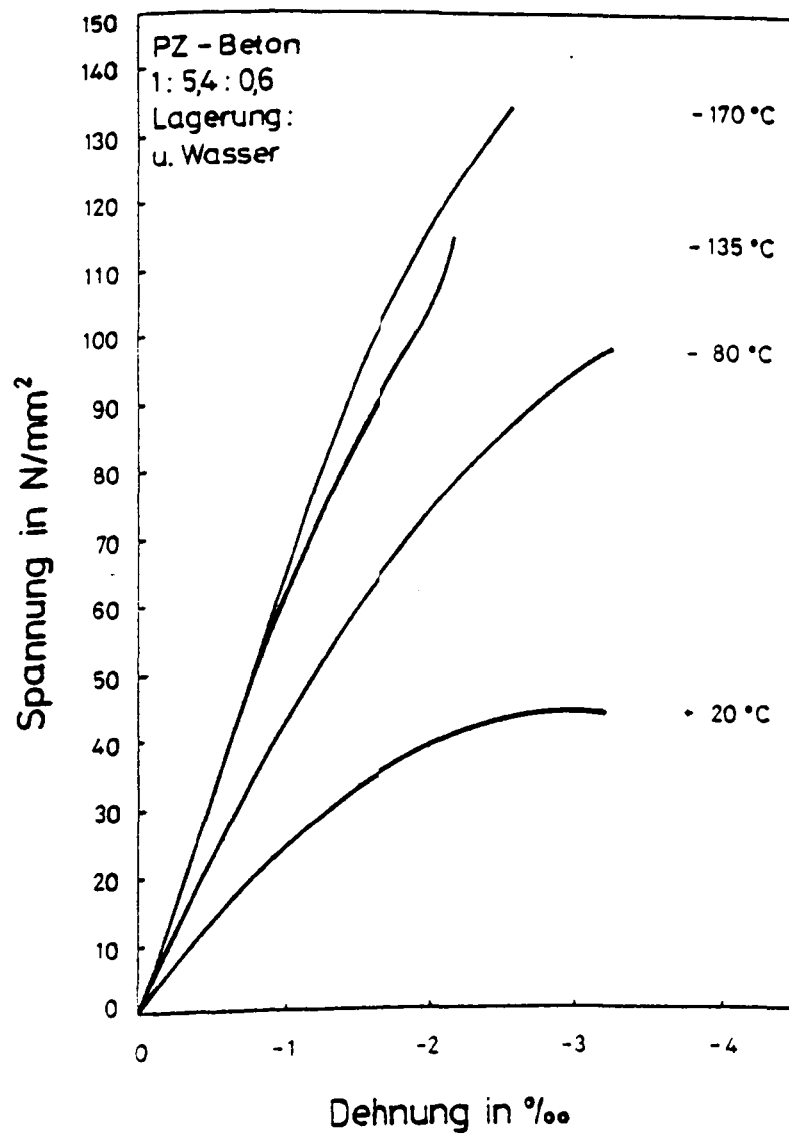
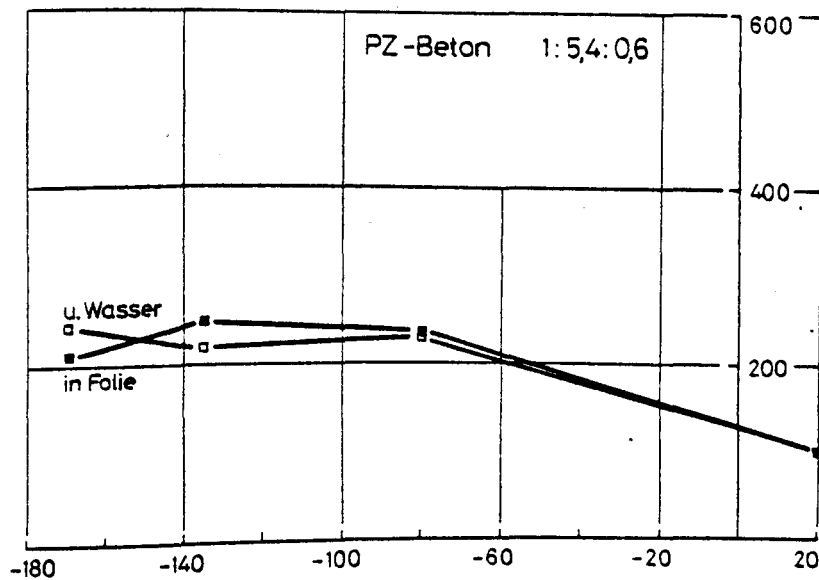
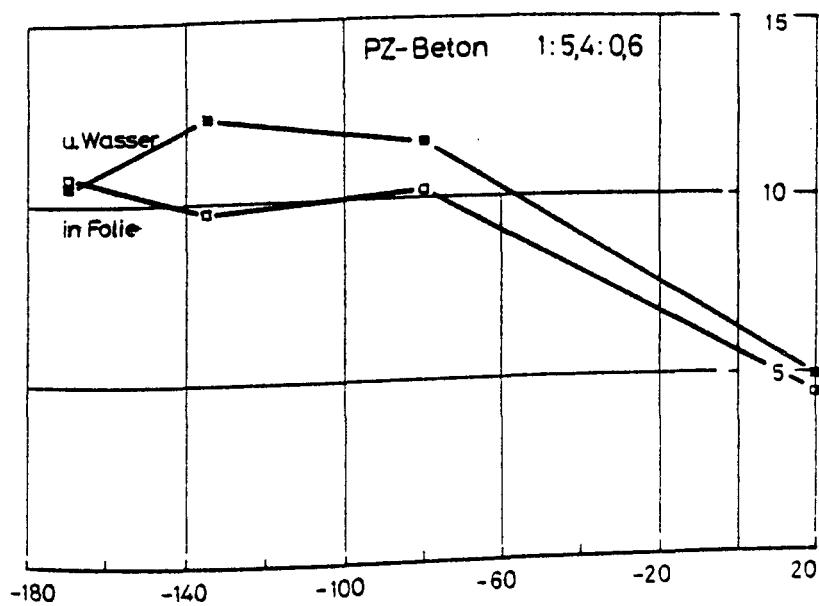


Bild 14: Spannungs-Dehnungs-Linien des Betons (B 45)  
 im Tieftemperaturbereich nach Wasserlagerung



$\beta_{SZ}(\theta)/\beta_{SZ}(+20^{\circ}\text{C})$  in %



Spaltzugfestigkeit  $\beta_{SZ}$  in N/mm²

Temperatur in °C

Bild 15: Spaltzugfestigkeit des Betons (B 45) im Tieftemperaturbereich nach unterschiedlichen Lagerungsbedingungen



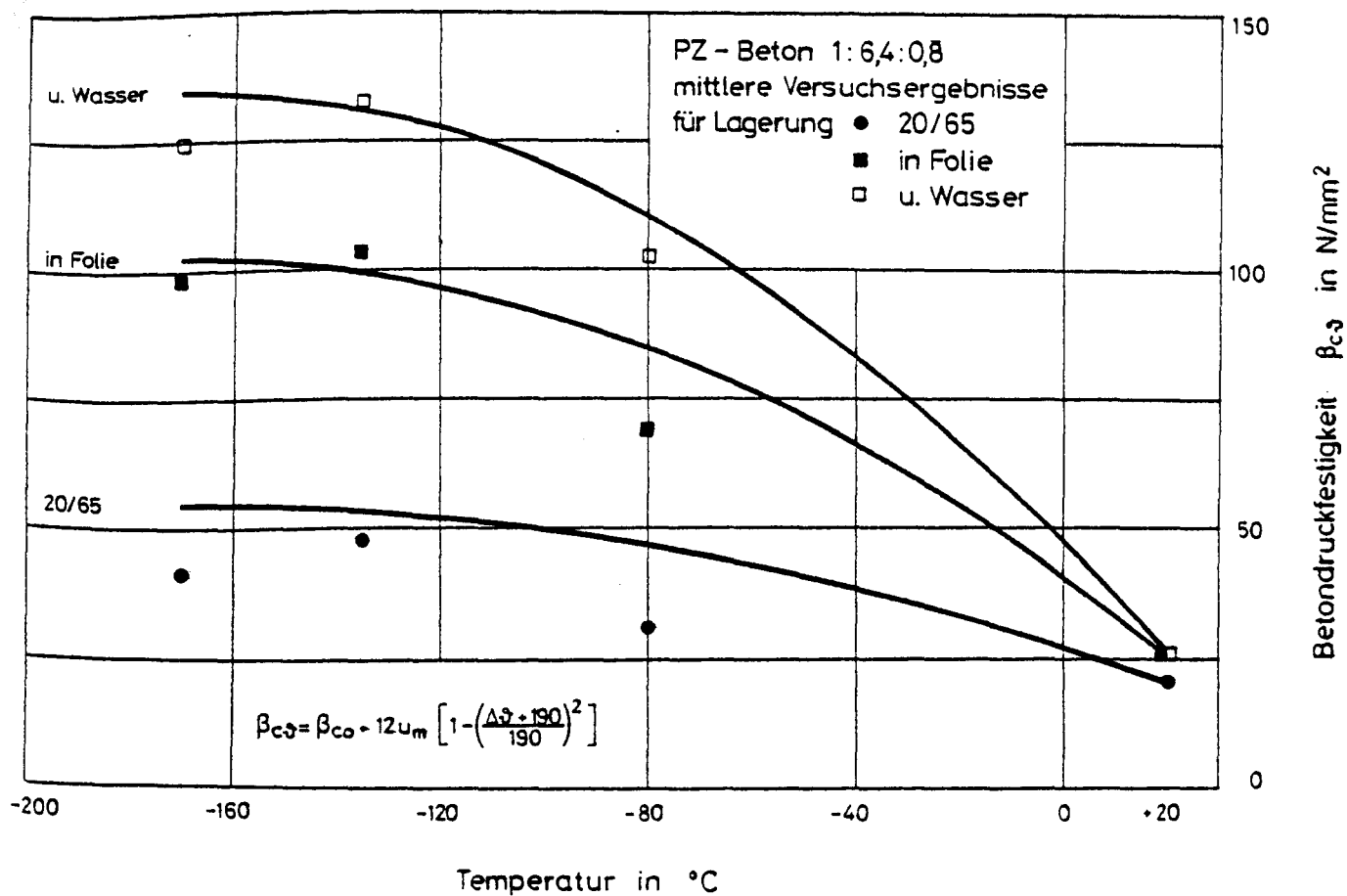


Bild 16: Druckfestigkeit von Beton (B 25) im Bereich tiefer Temperaturen nach Gleichung 3

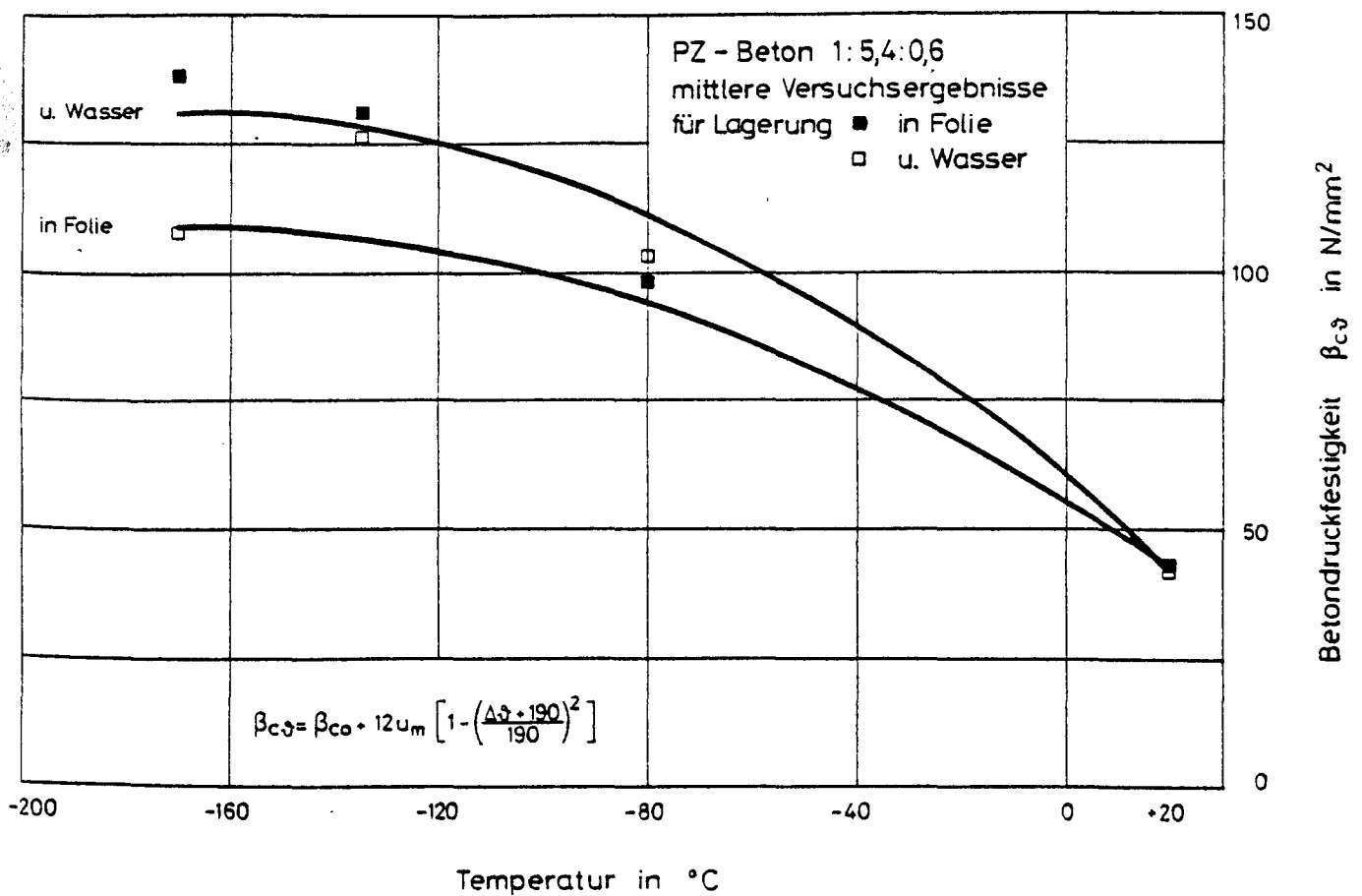


Bild 17: Druckfestigkeit von Beton (B 45) im Bereich tiefer Temperaturen nach Gleichung 3

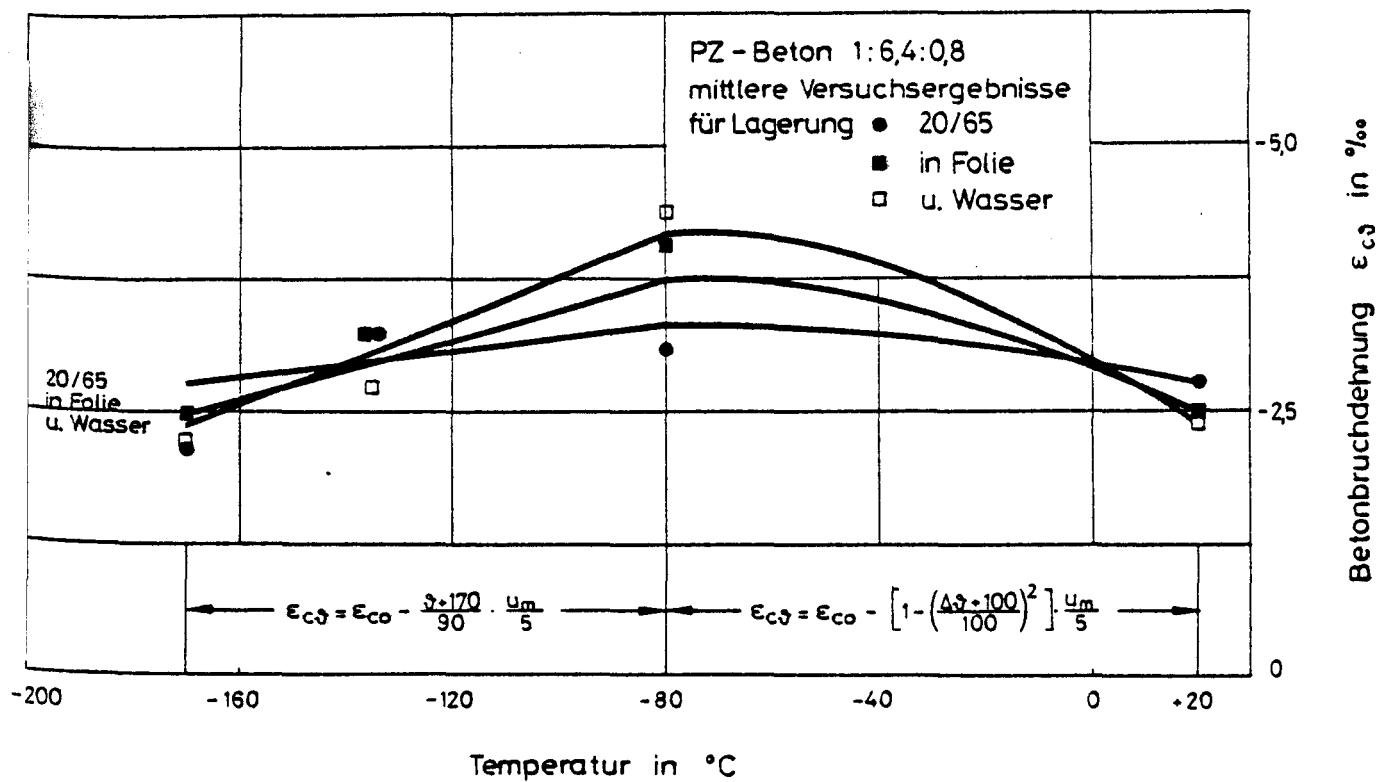


Bild 18: Bruchdehnung von Beton (B 25) im Bereich tiefer Temperaturen nach Gleichungen 6 und 7

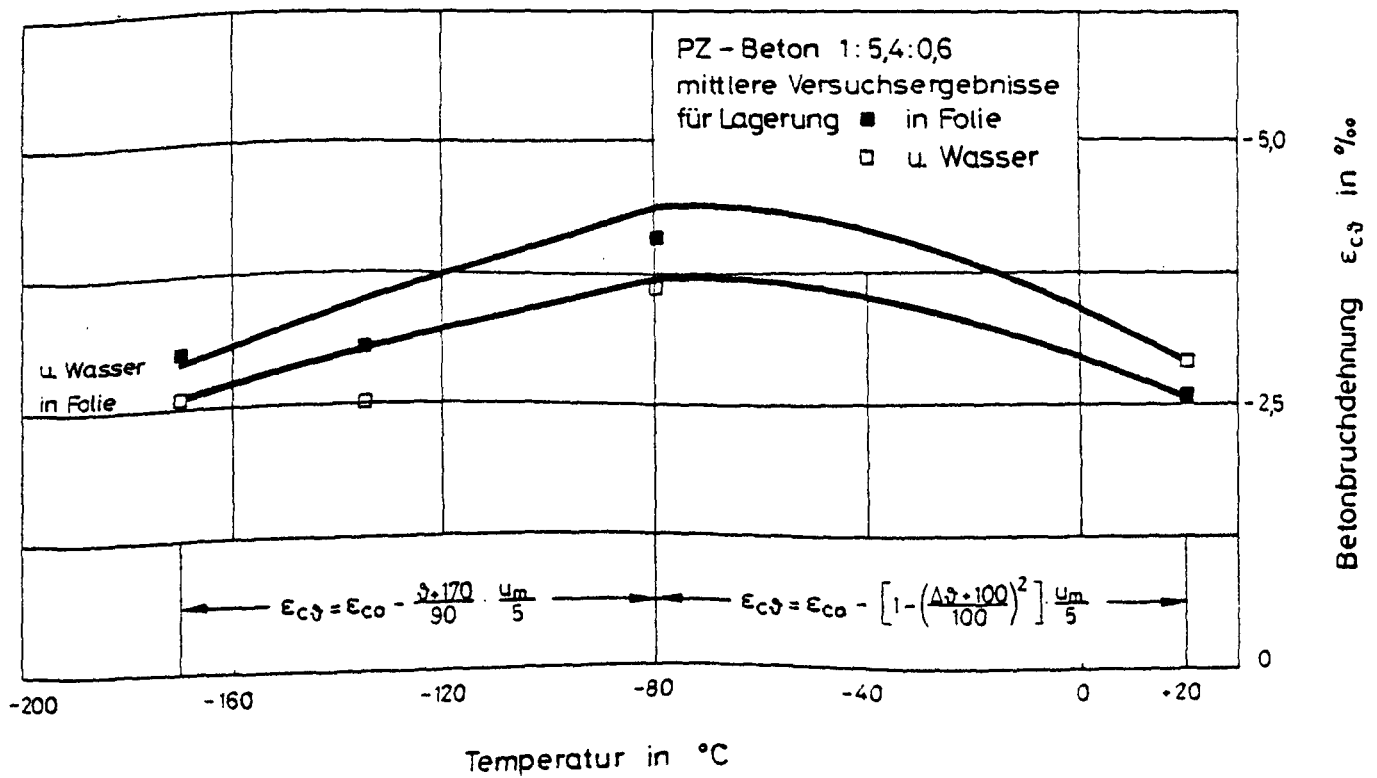


Bild 19: Bruchdehnung von Beton (B 45) im Bereich tiefer Temperaturen nach Gleichungen 6 und 7

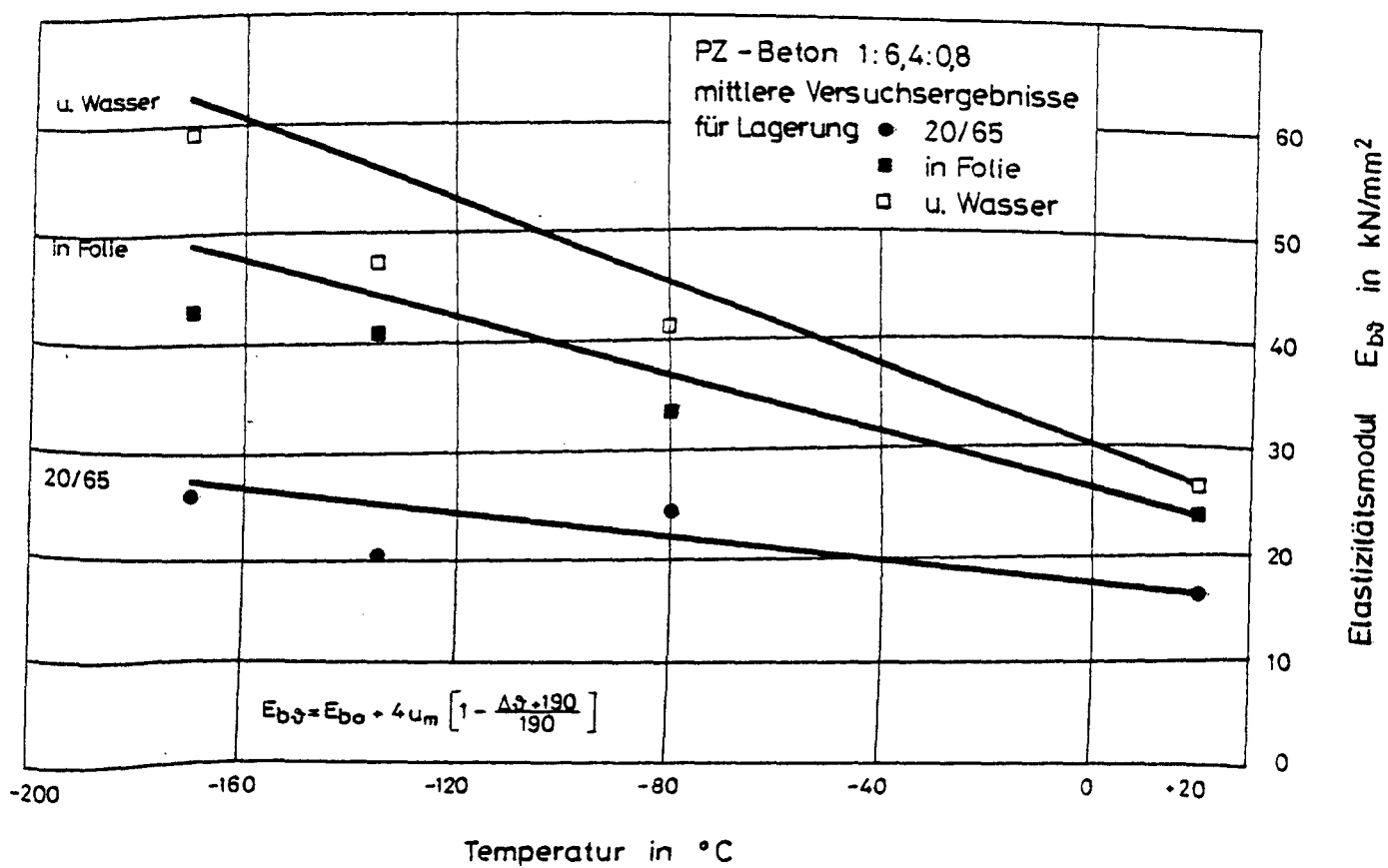


Bild 20: Druckelastizitätsmodul von Beton (B 25) im Bereich tiefer Temperaturen nach Gleichung 9

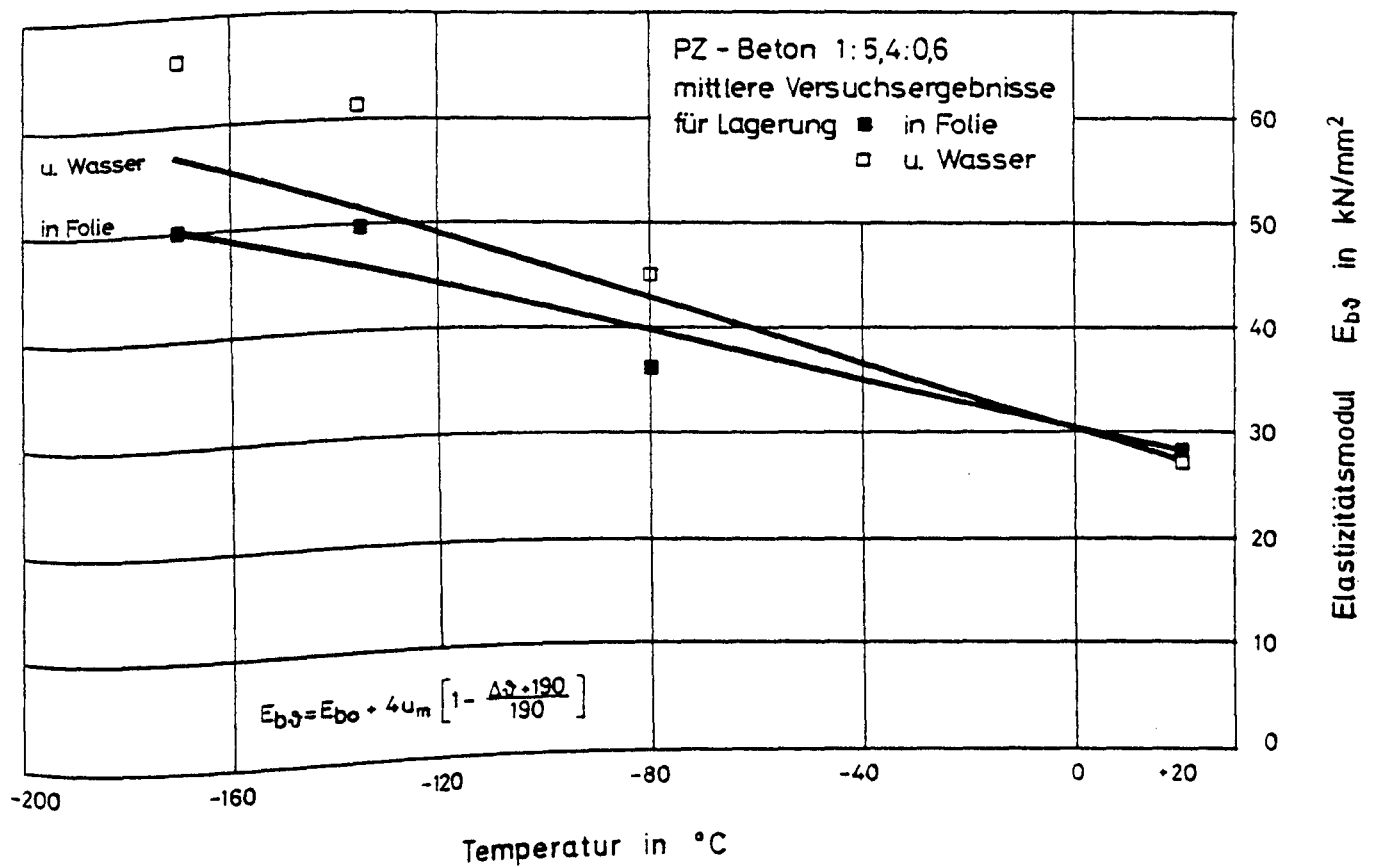


Bild 21: Druckelastizitätsmodul von Beton (B 45) im Bereich tiefer Temperaturen nach Gleichung 9

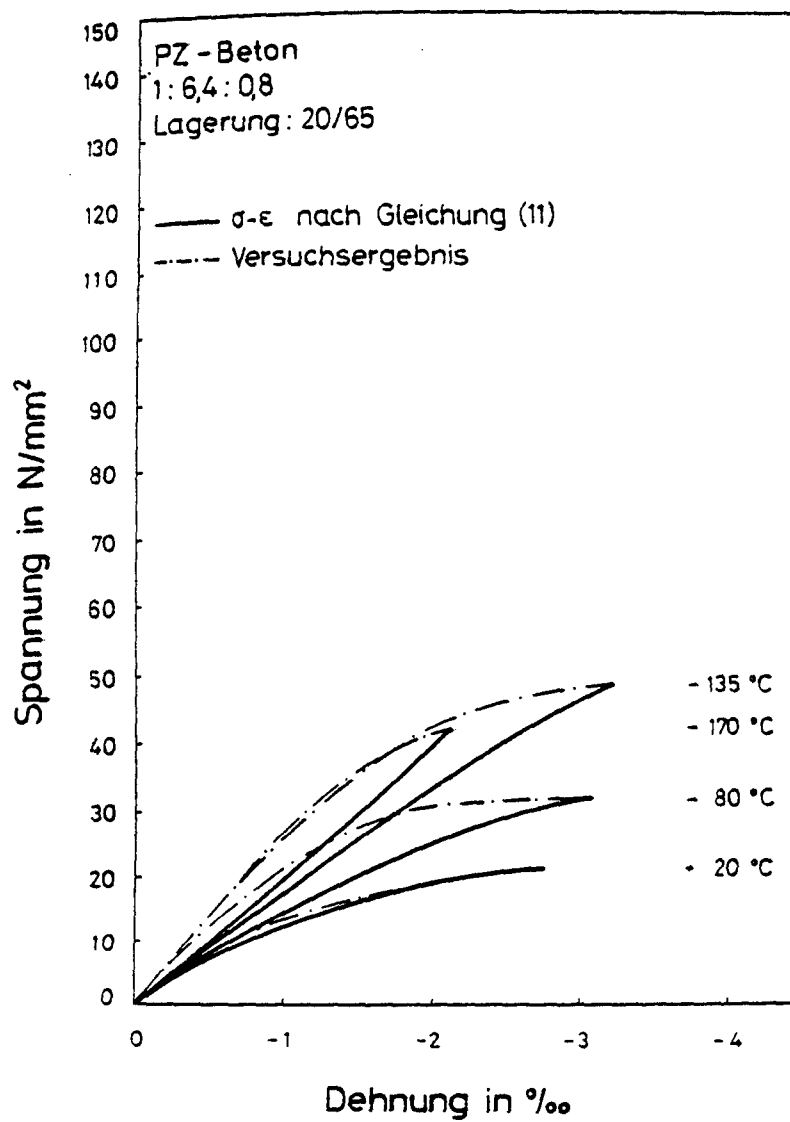


Bild 22:  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linie für Beton (B 25) nach Normal-lagerung nach Gleichung 11

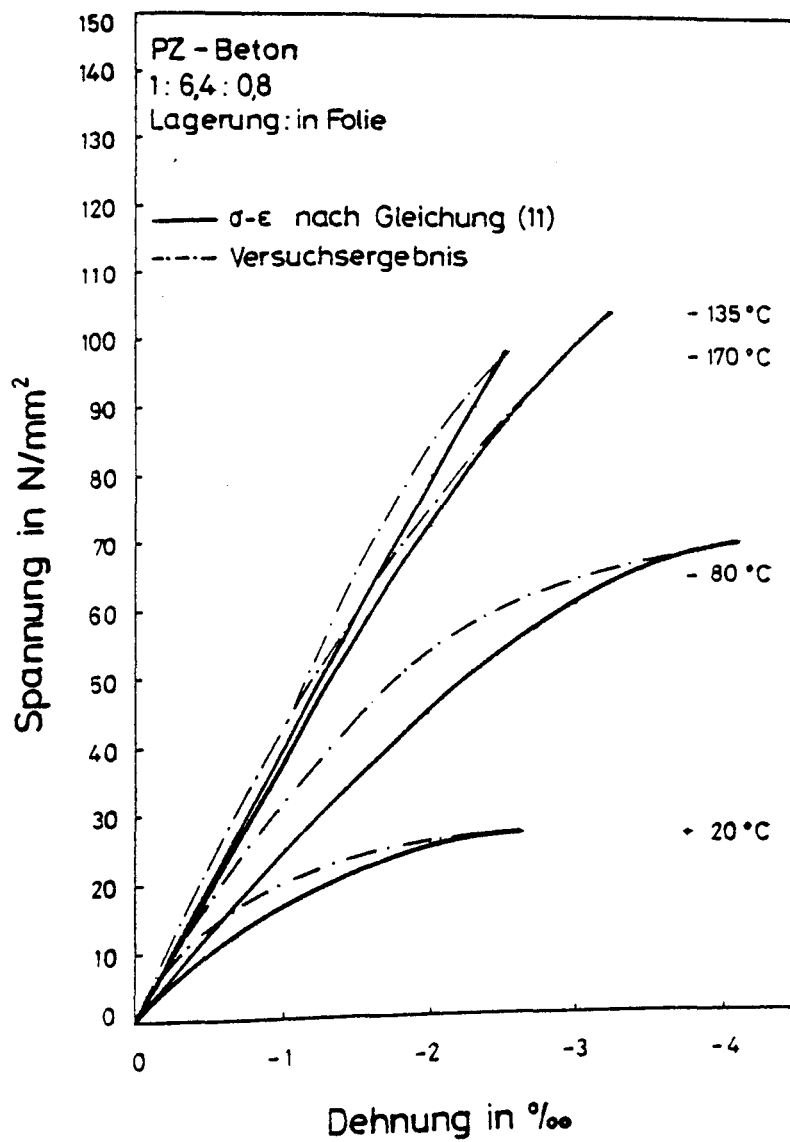


Bild 23:  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien für Beton B 25 nach Folienlagerung nach Gleichung 11



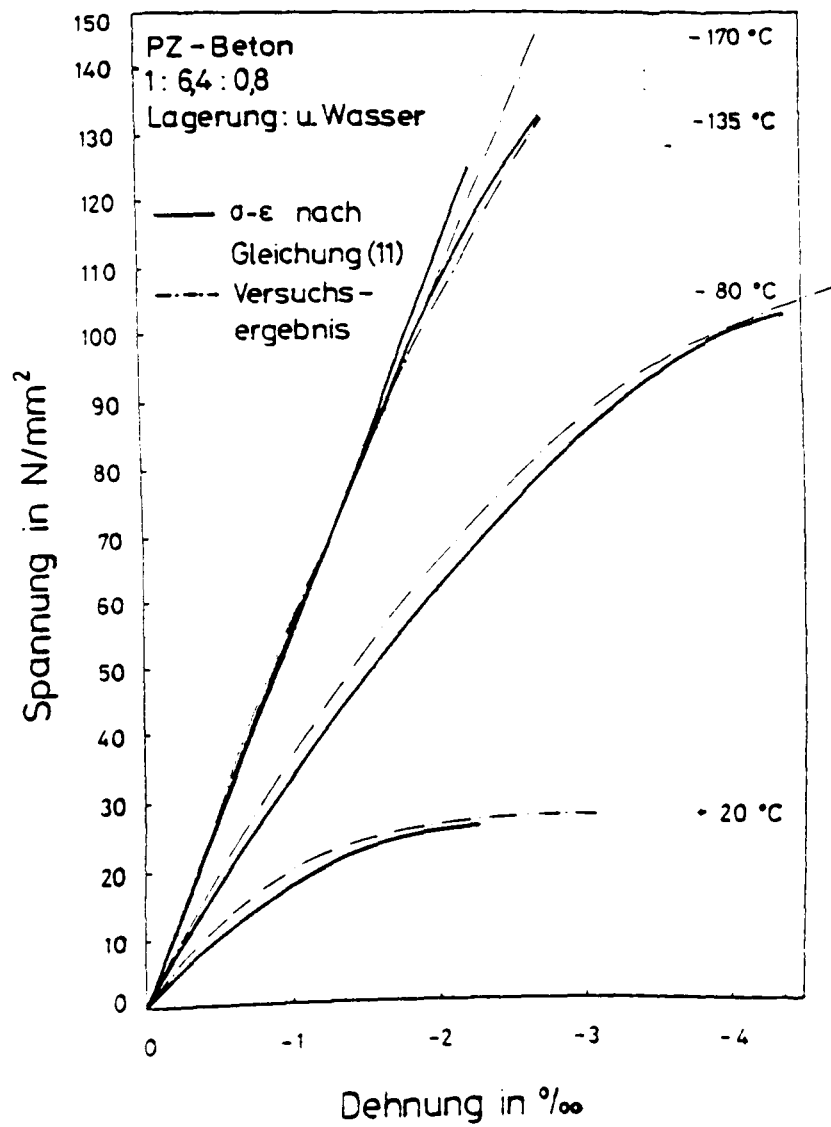


Bild 24:  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien für Beton (B 25) nach Wasser-  
lagerung nach Gleichung 11

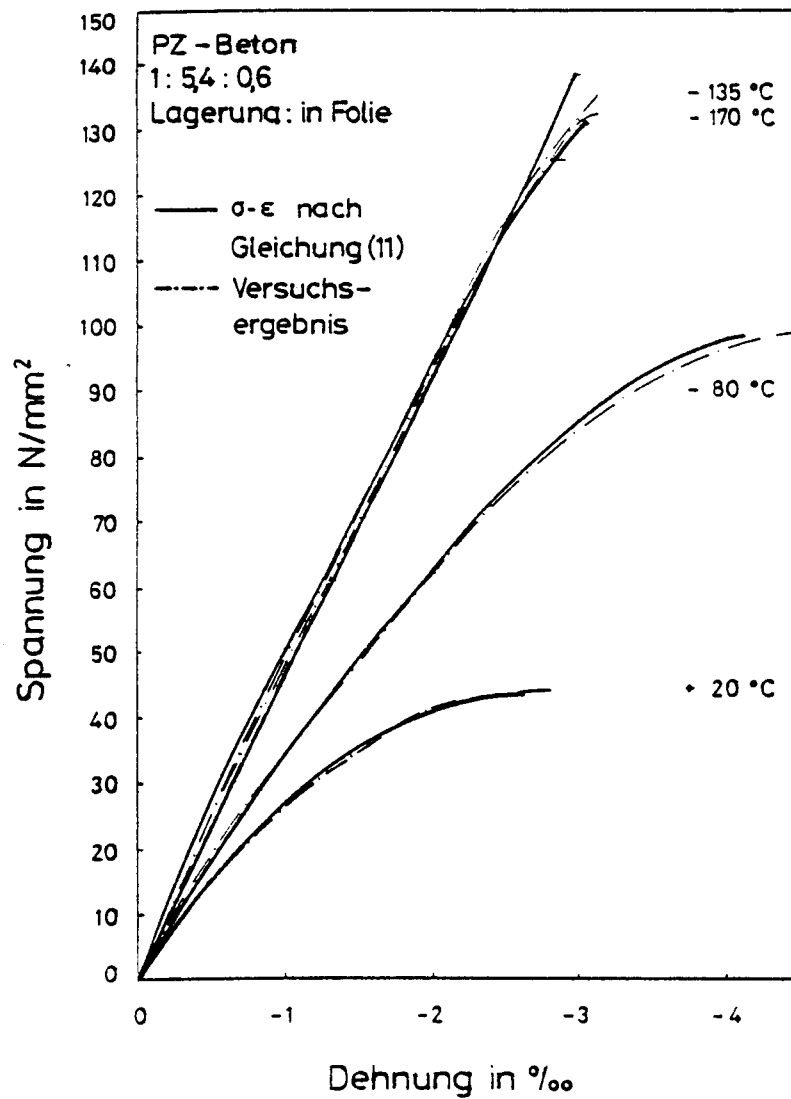


Bild 25:  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien für Beton (B 45) nach Folienlagerung nach Gleichung 11

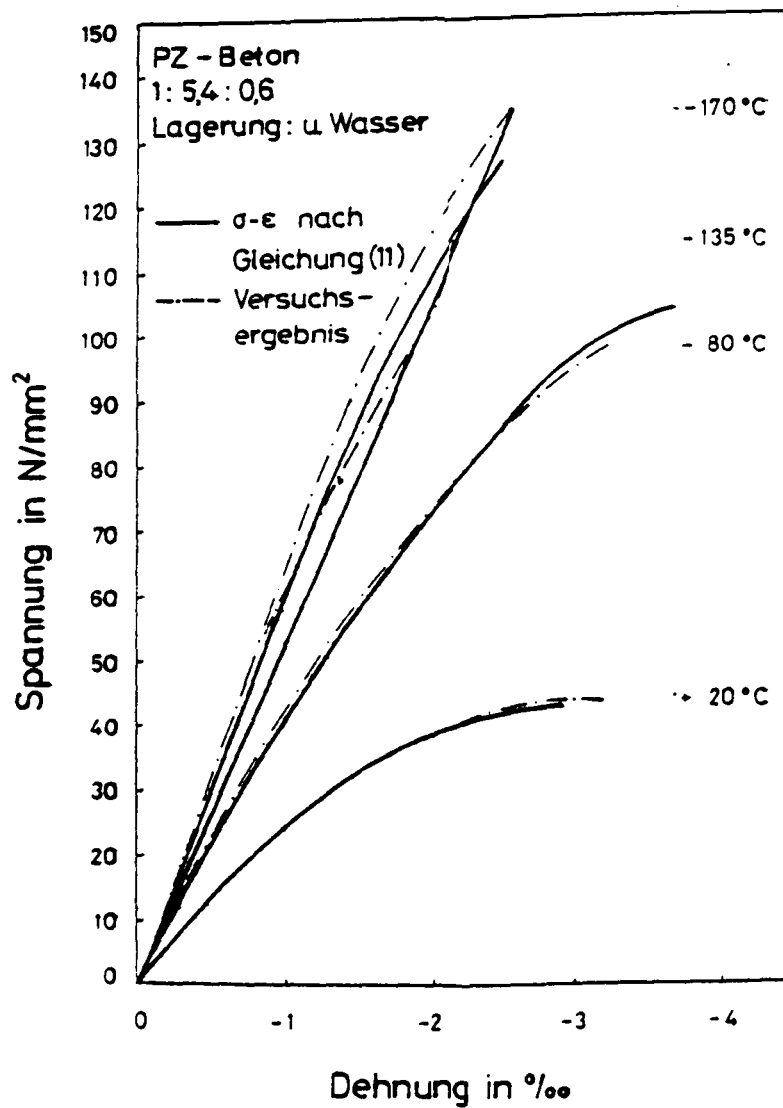


Bild 26:  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien für Beton (B 45) nach Wasser-  
lagerung nach Gleichung 11

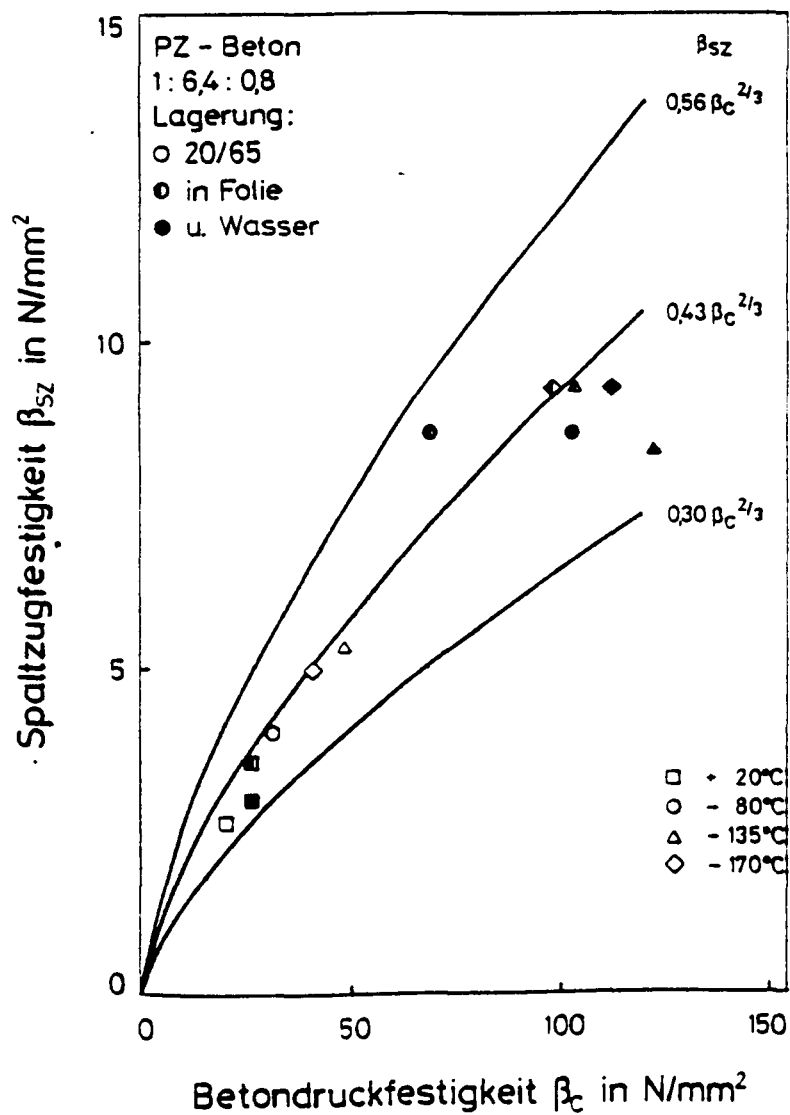


Bild 27: Zusammenhang von Zylinderdruckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit des Betons (B 25) im Bereich tiefer Temperaturen

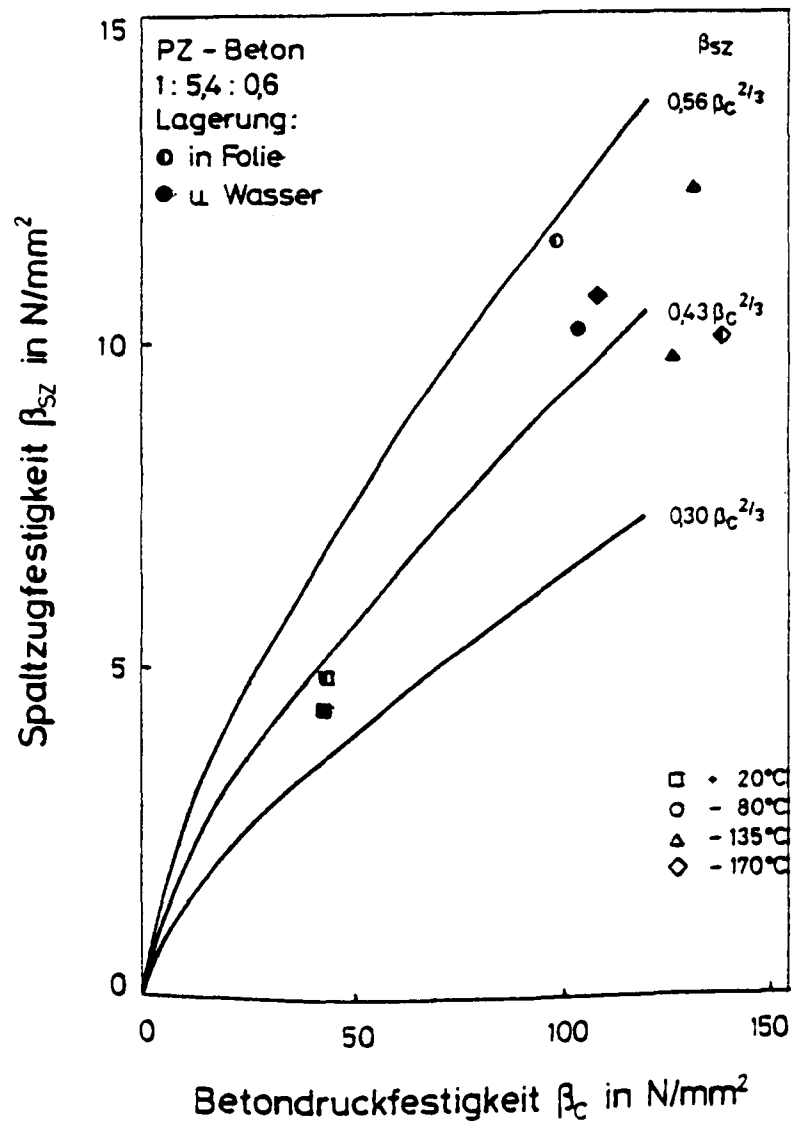


Bild 28: Zusammenhang von Zylinderdruckfestigkeit und Spaltzugfestigkeit von Beton (B 45) im Bereich tiefer Temperaturen

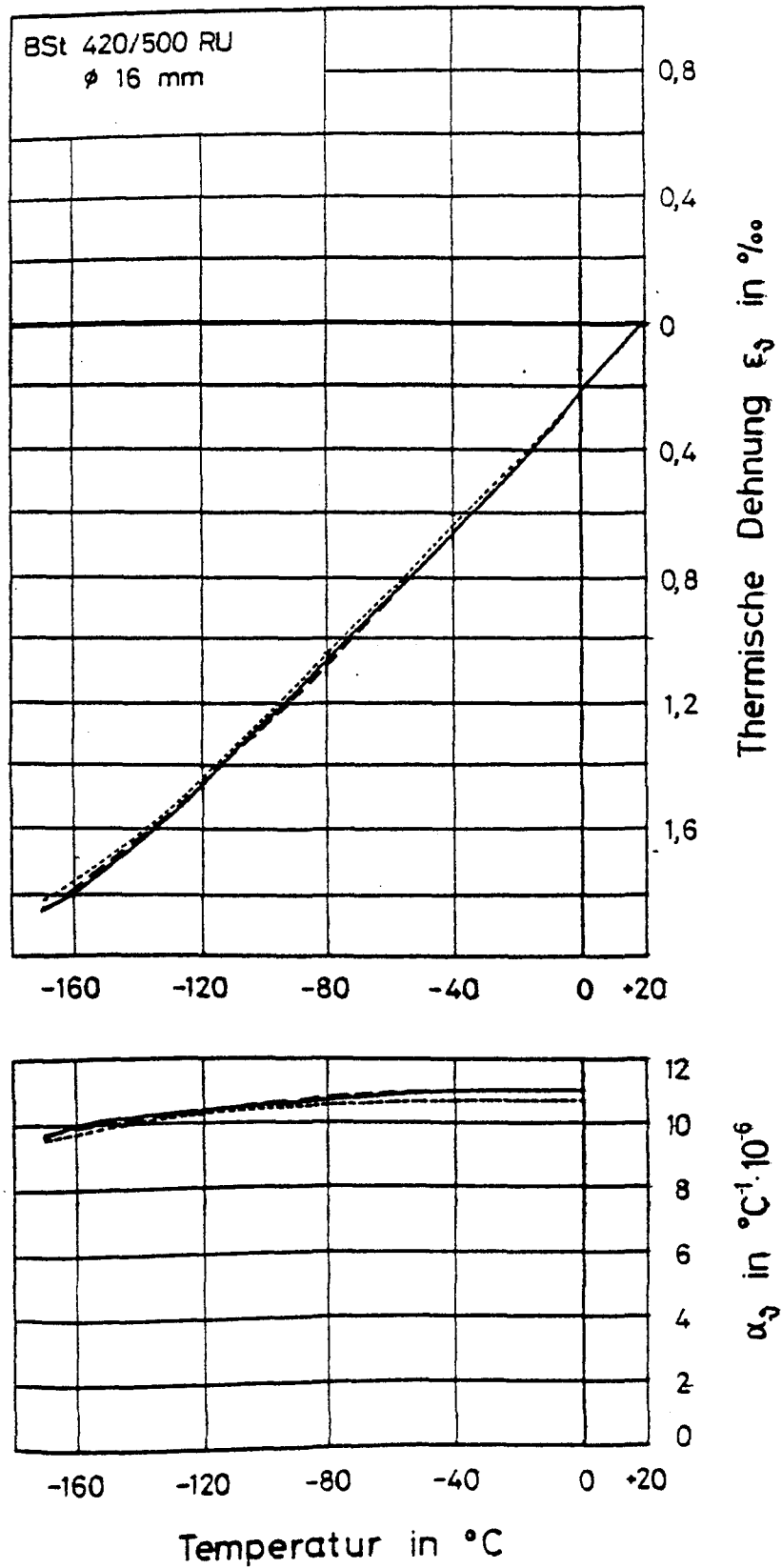


Bild 29: Thermische Dehnung des Betonstahls BSt 420/500 RU

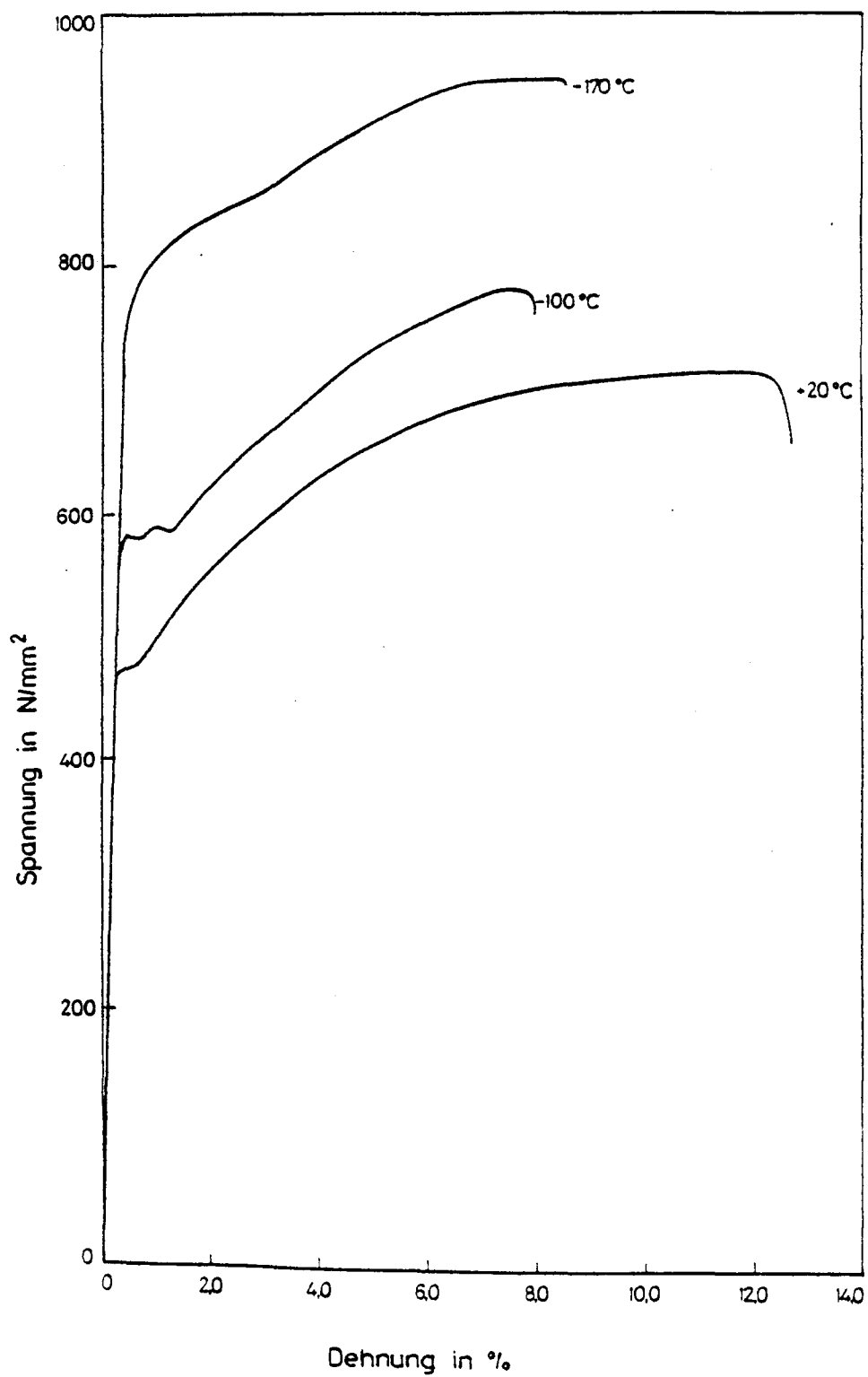


Bild 30:  $\sigma$ - $\epsilon$ -Linien für BSt 420/500 bei tiefen Temperaturen

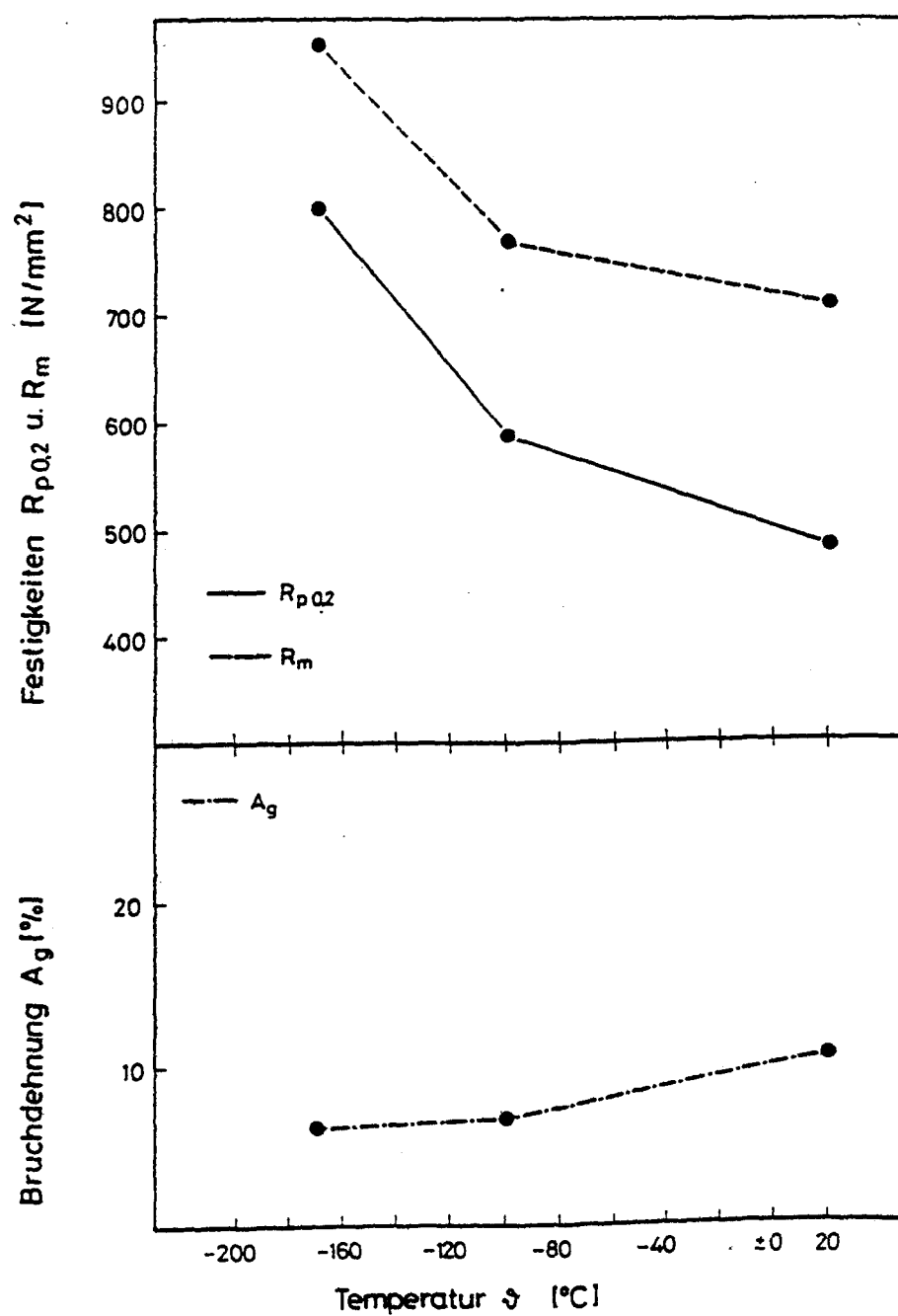


Bild 31a: Festigkeitswerte von BSt 420/500 RU



Sym.	Lit	d <sub>s</sub>	Bez.	C	Si	Mn	P	S	N
○	38	8	BSt IV RUS	0,18	<0,6	1,3	<0,05	<0,05	<0,012
□	38	8	BSt III RU		<0,6				
▲	26	16	T.5	0,2	0,104	0,74	0,022	0,017	
x	26	10	H.R.	0,19	0,26	0,82	0,03	0,015	0,011
■	8								
●	28	29-10	SD 35						

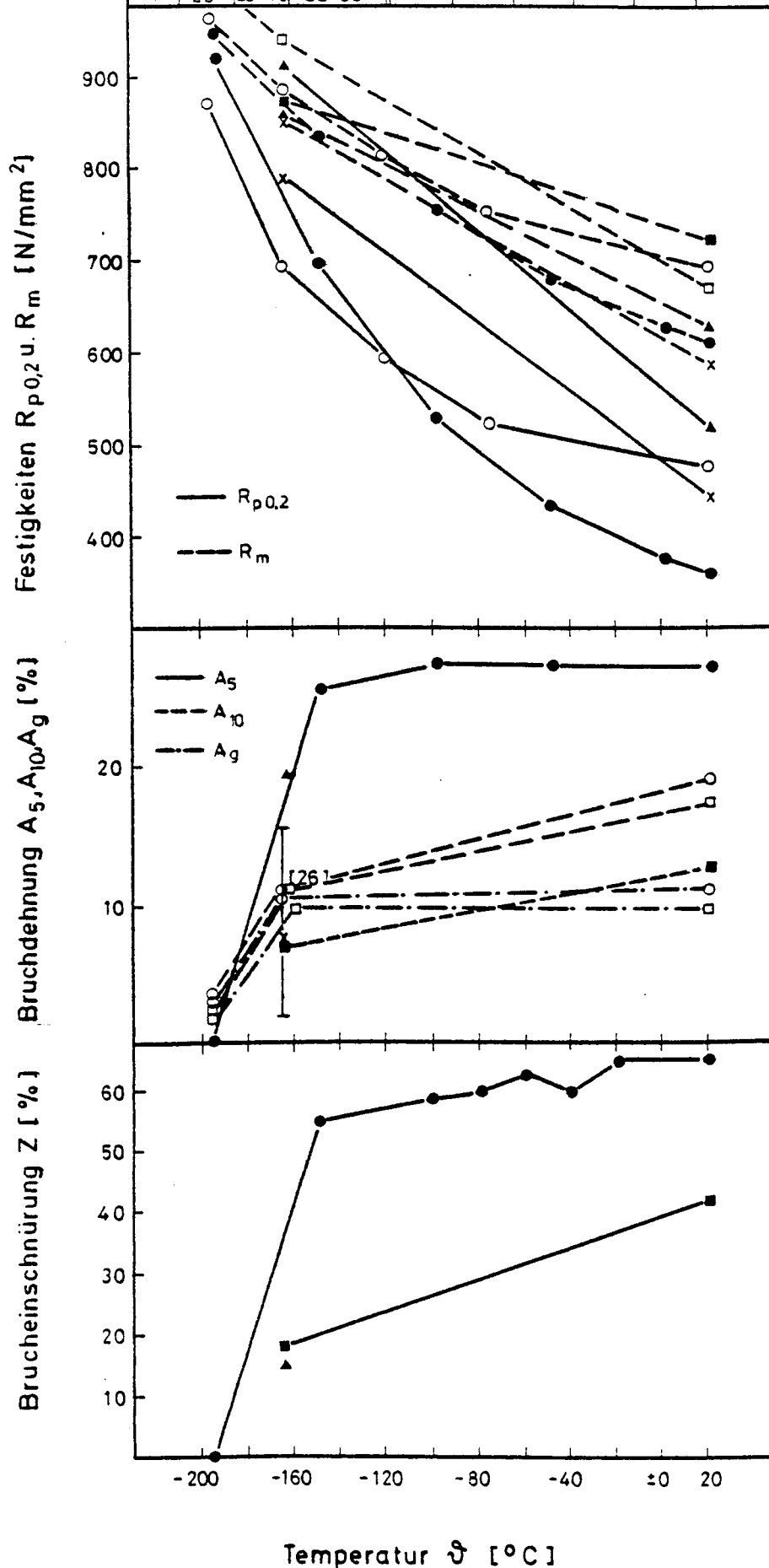


Bild 31b: Versuchsergebnisse nach /3/

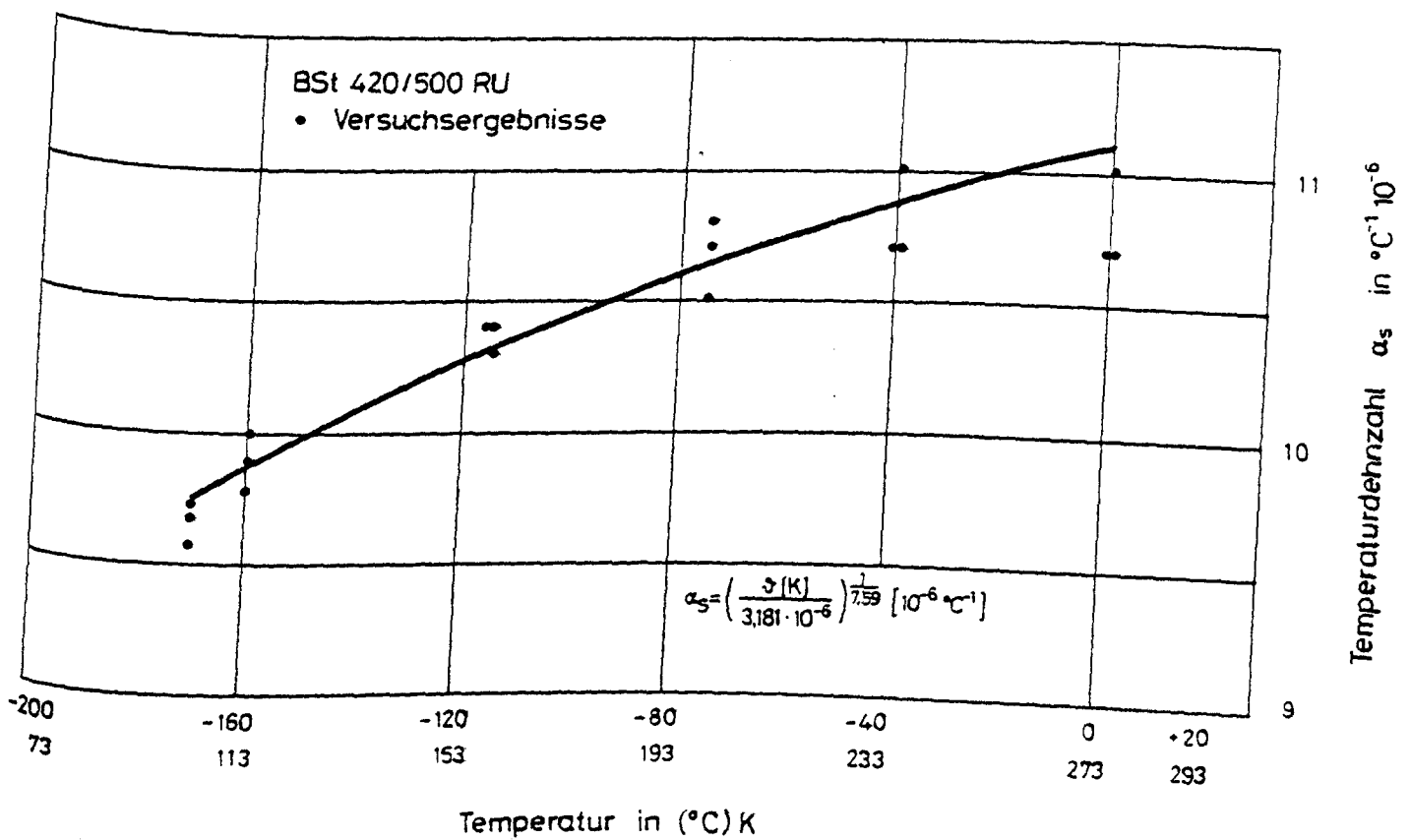


Bild 32: Wärmedehnzahl von Betonstahl BSt 420/500 für den Tieftemperaturbereich nach Gleichung 13

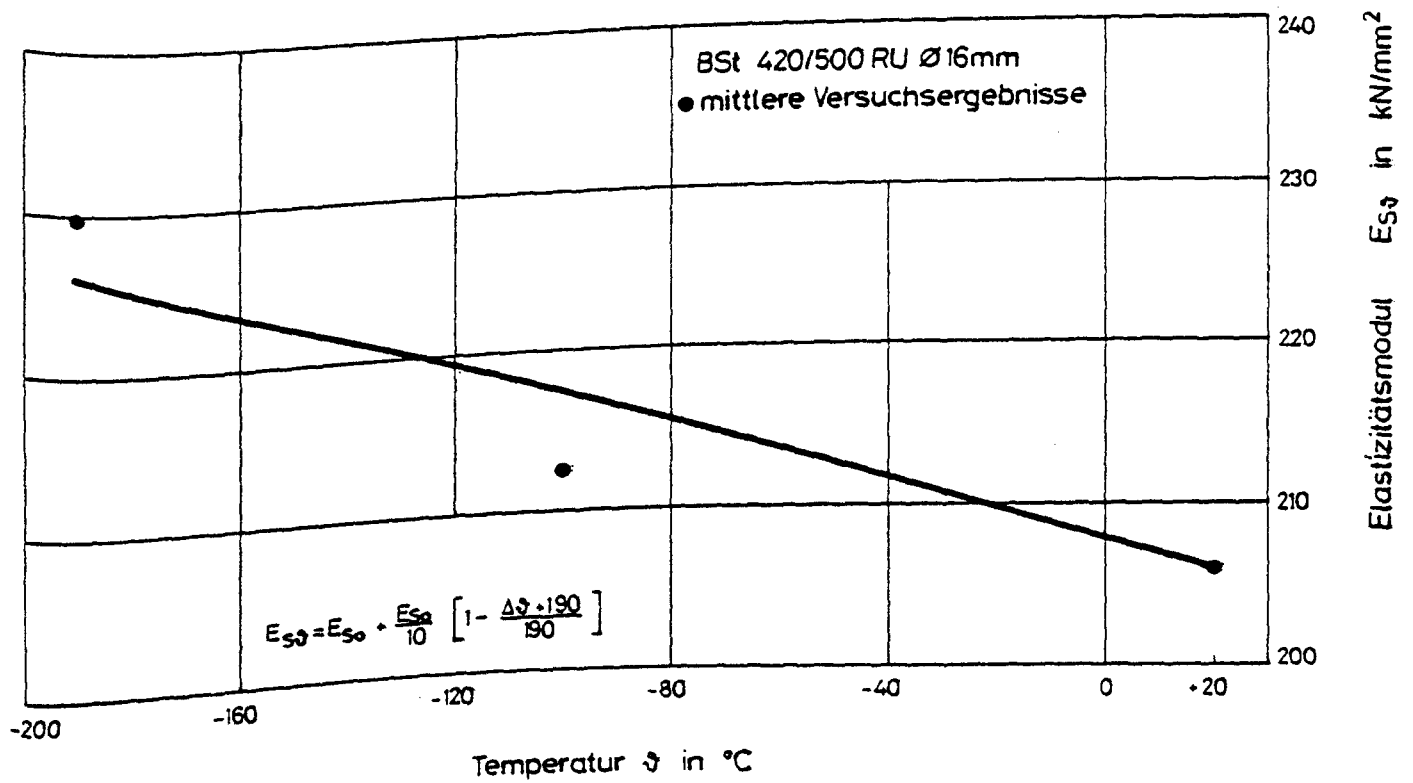


Bild 33: Elastizitätsmodul von Betonstahl BSt 420/500 für den Tieftemperaturbereich nach Gleichung 14

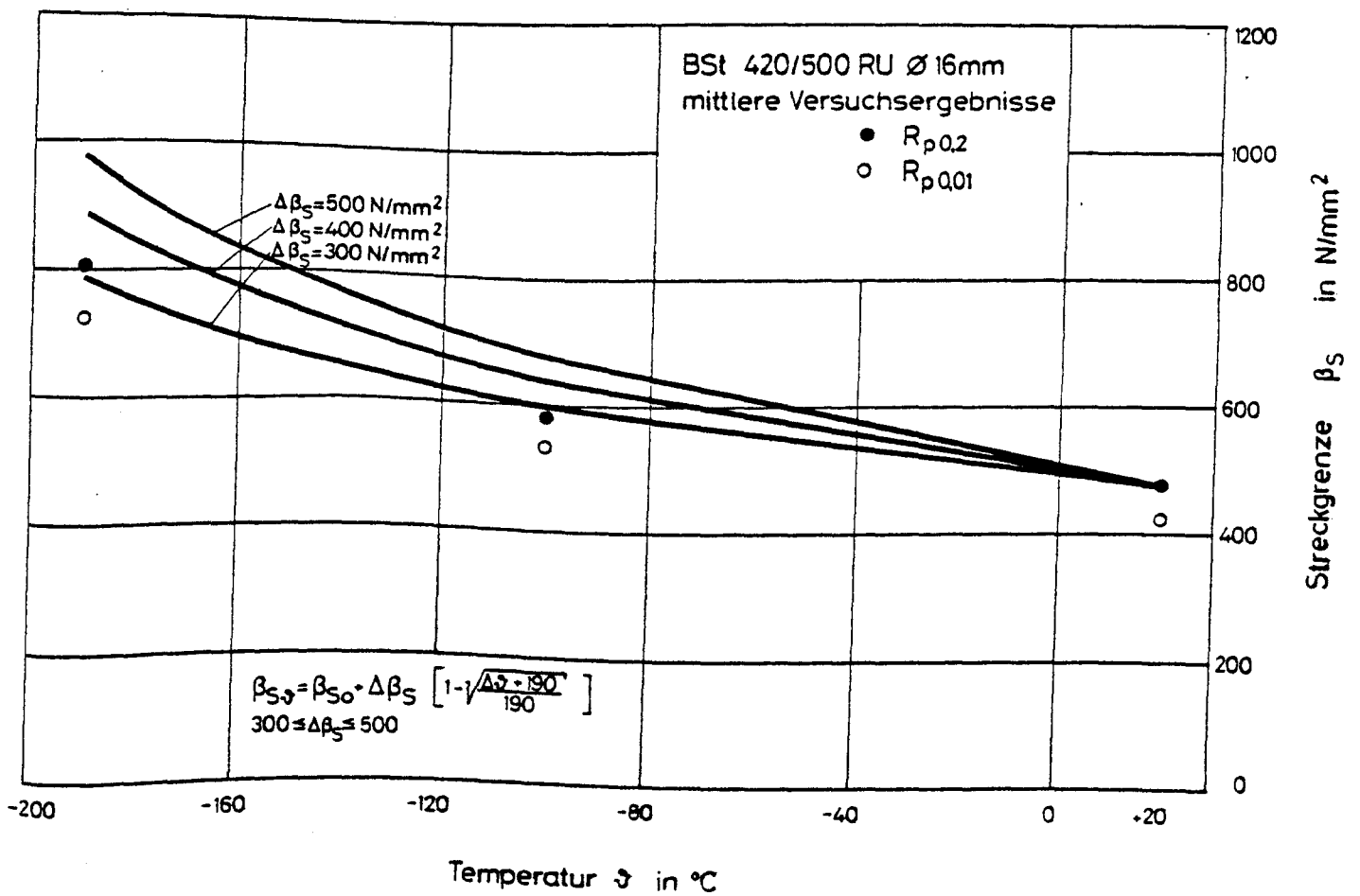
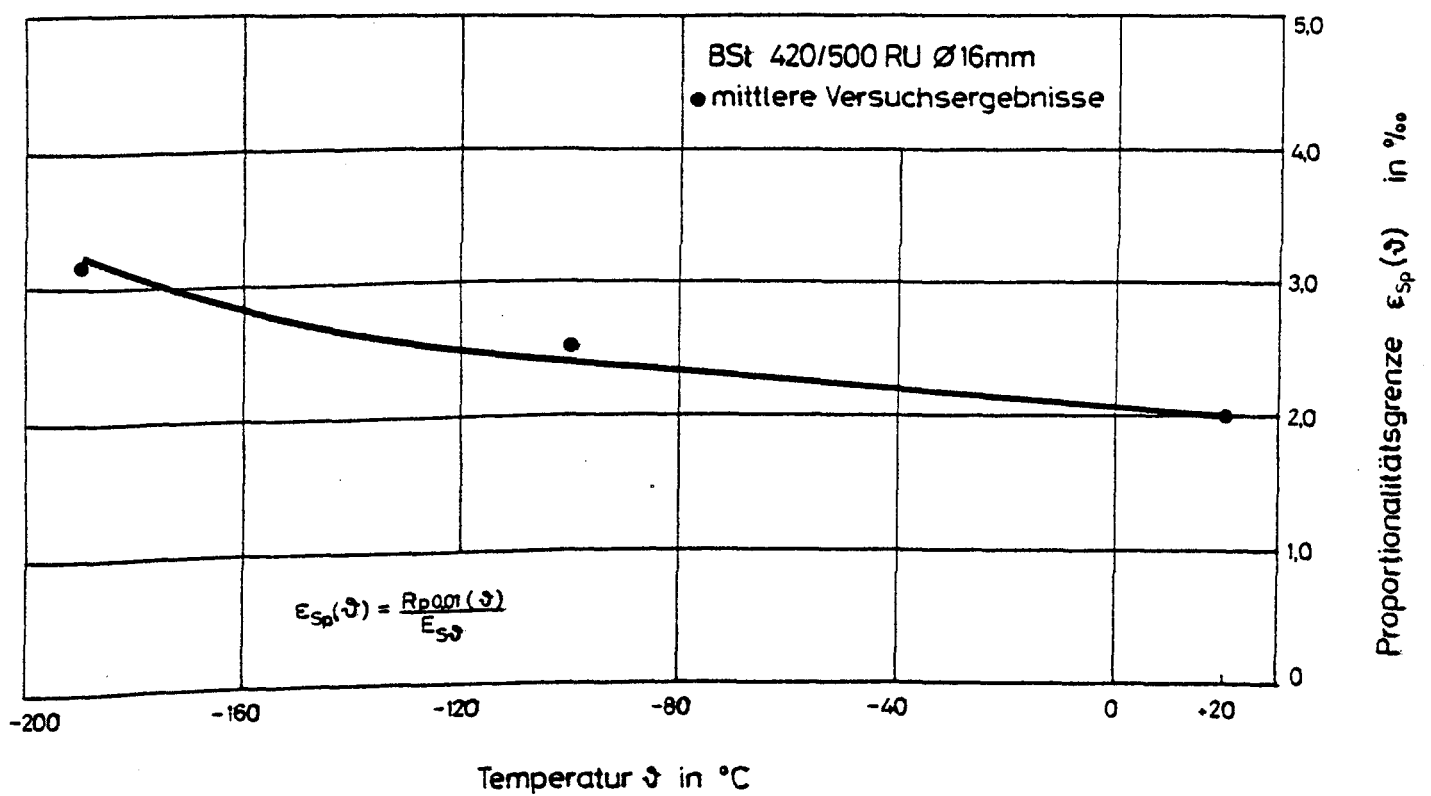


Bild 34: Streckgrenze von Betonstahl BSt 420/500 für den Tieftemperaturbereich  
 nach Gleichung 16



**Bild 35:** Proportionalitätsgrenze von Betonstahl BSt 420/500 für den Tieftemperaturbereich nach Gleichung 17

DBBOR : 12  
Verop1 : 09  
30-01081